



Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden
korkeakoulu

Riku Tujunen

Perinteisten asfalttibetonipäällysteiden korvaamismahdollisuudet matalalämpöasfaltilla Helsingissä osana kasvihuonepäästöjen vähentämistä

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.5.2016

Valvoja: Professori Terhi Pellinen

Ohjaajat: TkT Jarkko Valtonen, DI Tomi Laine

Tekijä Riku Tujunen

Työn nimi Perinteisten asfalttibetonipäällysteiden korvaamismahdollisuudet matalalämpöasfaltilla Helsingissä osana kasvihuonepäästöjen vähentämistä

Koulutusohjelma Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma

Pää-/sivuaine Liikenne- ja tietekniikka

Koodi R3004

Työn valvoja Professori Terhi Pellinen

Työn ohjaajat TkT Jarkko Valtonen ja DI Tomi Laine

Päivämäärä 30.5.2016

Sivumäärä 87+33

Kieli suomi

Tiivistelmä

Matalalämpöasfaltilla (MLA) tarkoitetaan asfalttimassaa, joka valmistetaan muunnellun sideaineen avulla tyypillisesti kymmeniä celsiusasteita matalammassa lämpötilassa kuin perinteiset asfalttimassat kuitenkin siten, että kiviainekset kuumamassan tapaan kuivataan. Muuntelemalla sideainetta asfalttimassa voidaan valmistaa matalammassa lämpötilassa, mutta sideaineen ominaisuudet käyttölämpötiloissa vastaavat kuitenkin perinteisissä asfalttimassoissa käytettyjen sideaineiden ominaisuuksia. Alentamalla valmistuslämpötilaa voidaan vähentää energiankulutusta ja siten myös valmistuksesta aiheutuvia kasvihuonepäästöjä.

Diplomityön tavoitteena oli tutkia matalalämpöasfaltin kestävyyttä verrattuna perinteiseen asfalttibetoniin Helsingissä sijaitsevien noin vuoden ikäisten koekohteiden avulla sekä selvittää MLA:n mahdollisten päästövähennysten merkitystä Helsingin ilmastotavoitteessa. Lisäksi tavoitteena oli arvioida kompensoivatko päästövähennykset mahdollista kestävyuden alentumista sekä esittää suositus matalalämpöasfalttien käyttömahdollisuuksista. Työssä selvitettiin ulkomailla käytössä olevien valmistuslämpötilaan perustuvien luokkien jaotteluperiaatteet, joiden pohjalta laadittiin ehdotus suomenkielisten vastineiden ja niiden luokittelun pääperiaatteista.

Kirjallisuusselvitys osoitti, että erilaisia sideainetta muuntelevia valmistusmenetelmiä on hyvin paljon ja myös niiden vaikutukset ovat vaihtelevia, mistä syystä vaikutuksia tulee arvioida tapauskohtaisesti. Valmistusmenetelmät voidaan kuitenkin jakaa kolmeen pääluokkaan, jotka ovat orgaanisten ja kemiallisten lisäaineiden käyttö sekä bitumin vaahdotus.

Kenttä- ja laboratoriokokeiden perusteella voidaan todeta, että todellinen sekoituslämpötila vaihtelee merkittävästi, mutta MLA-massat tiivistyvät matalissakin lämpötiloissa riittävän hyvin. MLA-koekohteiden urautuminen ei ollut poikkeavaa perinteiseen asfalttibetoniin verrattuna ja kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyydellä on merkittävin vaikutus päällysteen urautumiseen. MLA-päällysteiden halkaisuvetolujuus- ja jäykkyysarvot olivat pienempiä kuin perinteisellä asfalttibetonilla, mutta tulokset olivat hyväksyttäviä.

Työssä havaittiin, että MLA-massoilla saavutettavien päästövähennysten vaikutus on marginaalinen Helsingin kaupungin ilmastotavoitteessa ja lisäksi MLA-massojen hinta on niin korkea, että päästöjen vähentäminen niiden avulla ei olisi kannattavaa, mutta tilanne voi muuttua, jos MLA-päällysteiden hinta laskee.

Avainsanat matalalämpöasfaltti, asfalttibetoni, kestävyys, kasvihuonepäästöt



Author Riku Tujunen

Title of thesis Feasibility of using warm mix asphalt as part of the solution for reducing greenhouse gas emissions in the City of Helsinki

Degree programme Transportation and Environmental Engineering

Major/minor Transportation and Highway Engineering

Code R3004

Thesis supervisor Professor Terhi Pellinen

Thesis advisors D.Sc. (Tech.) Jarkko Valtonen and M.Sc. (Tech.) Tomi Laine

Date 30.5.2016

Number of pages 87+33

Language Finnish

Abstract

Warm Mix Asphalt (WMA) is manufactured with a dried aggregate and altered asphalt binder at reduced temperatures compared with conventional Hot Mix Asphalt (HMA). The altered binder enables lowering the mixing temperature, while maintaining equivalent properties at service temperatures compared with binders, which are regularly used in Hot Mix Asphalts. The reduced mixing temperature decreases energy consumption, which leads to lower greenhouse gas emissions.

The aim of this master's thesis was to research the durability of WMAs compared with conventional Hot Mix Asphalt Concrete (HMA) in Helsinki via field paving test sites, which were laid approximately one year ago. Another aim was to investigate the significance of the potential greenhouse gas reductions in the context of climate targets of the city of Helsinki. The aim was also to evaluate if the potential greenhouse gas reductions compensate for the possible reduction of pavement durability and to assess feasibility of using WMAs to give recommendations. The thesis also gives temperature based classification for asphalt mixes used abroad and a recommendation for the equivalent Finnish translations and classification principles.

Literature review revealed that there are a variety of different binder viscosity reducing techniques available and their use should be considered case by case. The WMA production techniques can, however, be divided into three main groups which are organic and chemical additives as well as binder foaming technologies.

Based on the field trials and laboratory tests it was found that the actual mixing temperature can vary significantly although the WMA pavements were compacted sufficiently even at lower temperatures. The permanent deformation of WMAs at the test sites was comparable with the HMA and the main cause for rutting was the durability of the aggregate against the wear of studded tires. The indirect tensile stiffness and strength test results of the WMA were lower in comparison with HMA, however the results were still acceptable.

Calculations suggest that the greenhouse gas reductions achieved by the use of WMAs have only marginal effects on the climate targets of the city of Helsinki. In addition, the cost of WMA is so high that it is not worthwhile to include it in the action list for climate targets at the moment. If prices come down, this may of course change.

Keywords warm mix asphalt, asphalt concrete, durability, greenhouse gas emissions

Alkusanat

Matalalämpöasfaltin tutkiminen Helsingissä alkoi syksyllä 2014, kun Vuotielle tilattiin matalalämpöasfalttipäällysteet kahdelta eri urakoitsijalta siten, että vaatimuksena oli valmistuslämpötilan madaltaminen kasvihuonepäästöjen alentamiseksi. Matalalämpöasfaltin käyttö ei ole yleistynyt Suomessa kuten ulkomailla ja aikaisempia koekohteita on hyvin vähän eikä niistä ole julkaistu tutkimustietoa.

Työssä lähdettiin selvittämään aihetta, johon ei ole, ainakaan julkisesti, perehdytty Suomessa tässä laajuudessa aiemmin, mutta toisaalta aihetta oli selvitetty ulkomailla hyvin perusteellisesti. Ennen työn aloitusta aiheen laajuudesta ei ollut realistista käsitystä, mikä kävi kuitenkin ilmi melko nopeasti. Työn aikana tutkimusten laajuus myös kasvoi, koska esimerkiksi kirjallisuuden perusteella havaittiin aiemmin käyttämättömien tutkimusmenetelmien kuvaavan hyvin matalalämpöasfalttipäällysteiden ominaisuuksia perinteisiin asfalttimassoihin verrattuina.

Diplomityön valvojana toimi professori Terhi Pellinen ja haluan kiittää häntä opetuksesta sekä ennen kaikkea työn valvomisesta ja loppuun saattamisesta. Haluan kiittää työn ohjaajina toimineita diplomi-insinööri Tomi Lainetta ja tekniikan tohtori Jarkko Valtosta. Haluan korostaa erityisesti Jarkon tuen ja neuvojen tärkeyttä aina ensimmäisen koekohteen tutkimusten suunnittelusta työn loppuun saattamiseen. Tämä oli pitkä, mutta antoisa taival. Kiitos Jarkko myös esimerkistä, jonka olet minulle asettanut alan asiantuntijana sekä vilpittömästi ystävällisenä ja avuliana ihmisenä.

Lisäksi haluan kiittää työkavereitani Staran katu- ja maalaboratoriossa, joiden apu on ollut korvaamattoman tärkeää tutkimusten onnistumisen kannalta. Työskentely laboratoriossa on edistänyt omaa oppimistani niin tietekniikan kuin geotekniikan osalta. Kiitos myös kotoisasta työilmapiiristä, josta olen saanut nauttia jo useamman vuoden ajan. Kiitän myös Aalto-yliopiston tielaboratorion henkilökuntaa avusta tutkimuksissa sekä opastuksesta.

Haluan kiittää myös perhettäni ja ystäviäni kaikesta tuesta ja hetkistä, joiden pohjalta olen saanut kasvaa ja oppia. Erityiskiitos kuuluu Veeralle, jonka ansiosta sain palautettua motivaationi koulunkäyntiin. Kiitos Veera kaikesta tulevasta ja menneestä, jonka olen saanut jakaa kanssasi.

Espoossa 30.5.2016

Riku Tujunen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.1.1	Energiatehokas Helsinki	1
1.1.2	Katujen rakentaminen ja ylläpito Helsingissä	2
1.2	Ongelman asettelu	3
1.2.1	Matalalämpöasfaltti Suomessa	3
1.2.2	Helsingin päällystystöistä aiheutuvat päästöt	4
1.3	Tavoitteet	4
1.4	Aiheen laajuus ja rajaukset	5
1.5	Käytetyt tutkimusmenetelmät ja hypoteesit	5
2	Matalalämpöasfaltti ja sen valmistusmenetelmät	7
2.1	Matalalämpöasfaltin kehitys	7
2.2	Matalalämpöasfaltti ja sen valmistaminen	8
2.3	Vaahdotusmenetelmien periaate	9
2.4	Orgaanisten lisäaineiden periaate	10
2.5	Kemiallisten lisäaineiden periaate	12
2.6	Suomessa käytetyt valmistusmenetelmät	12
2.7	Matalalämpöasfaltin mahdolliset käyttörajoitukset	13
3	Valmistusmenetelmien vaikutuksia asfaltin ominaisuuksiin ja toimintaan	16
3.1	Vaikutusten arviointi	16
3.2	Sideaineen reologia ja vanheneminen	16
3.3	Asfalttimassan tiivistyminen, jäykkyys ja urautuminen	19
3.4	Mahdollisia vaurioita ja arvioita vauriomekanismeista	27
3.5	Vaikutuksia asfalttimassan suunnitteluun	30
3.6	Energiankulutus, päästöt ja päällysteen hinta	32
4	Mahdolliset päästövähennykset Helsingissä	41
4.1	Asfaltointiurakoiden laajuus	41
4.2	Mahdolliset päästövähennykset	43
4.3	Päästövähennysten taloudelliset kokonaisvaikutukset	45
5	Matalalämpöasfalttikohteet Helsingissä	47
5.1	Yleistä kohteista	47
5.2	Vuotie	47
5.2.1	Kohteen esittely ja liikennemäärät	47
5.2.2	Levityslämpötilamittaukset	50
5.2.3	Uraprofilimittaukset ja tulosten tulkinta	51
5.2.4	Laboratoriokokeet ja tulosten tulkinta	56
5.3	Kallvikintie	62
5.3.1	Kohteen esittely ja liikennemäärät	62
5.3.2	Levityslämpötilamittaukset	63
5.3.3	Laboratoriokokeet ja tulosten tulkinta	64
6	Pohdintaa ja suositukset	73
6.1	Asfalttimassojen luokittelu valmistuslämpötilan perusteella	73

6.2	Matalalämpöasfalttien käyttömahdollisuudet	74
6.2.1	Laatuvaatimukset ja CE-merkintä	74
6.2.2	Kulutuskestävyys	75
6.2.3	Päästövähennykset ja taloudelliset vaikutukset	76
6.3	Jatkotutkimukset	77
7	Yhteenveto	79
	Lähdeluettelo	81
	Liitteet	

Lyhenteet

AA	Avoin asfaltti
AB	Asfalttibetoni
ABK	Kantavan kerroksen asfalttibetoni
ABS	Sidekerroksen asfalttibetoni
ABT	Tiivis asfalttibetoni
CO ₂ -ekv.	Hiilidioksidiekvivalentti
Creep-koe	Jaksollinen virumiskoe
ETA	Eurooppalainen tekninen arviointi
HKR	Helsingin kaupungin rakennusvirasto
HVL-suhdeluku (TSR)	Halkaisuvetokokeiden suhde (Tensile Strenght Ratio)
HVL (ITS, IDT strength)	Halkaisuvetolujuus (Indirect Tensile Strenght)
HWTT	Hamburg Wheel Tracking Test
KA (HMA)	Kuuma-asfaltti (Hot Mix Asphalt)
KyA (CMA)	Kylmäasfaltti (Cold Mix Asphalt)
LEA	Low Energy/Emission Asphalt
MLA (WMA)	Matalalämpöasfaltti (Warm Mix Asphalt)
PAB	Pehmeä asfalttibetoni
PG	Performance Grade
PMLA (HWMA)	Puolimatalalämpöasfaltti (Half Warm Mix Asphalt)
Prall-koe	Nastarengaskulutuskestävyyskoe
RTFOT	Rolling Thin-Film Oven Test
SBS	Styreenibutadieenikumi
SMA	Kivimastiksiasfaltti (Stone Matrix Asphalt)
Stara	Helsingin kaupungin rakentamispalvelu
VA	Valuasfaltti
VOC	Haihtuva orgaaninen yhdiste (Volatile organic compound)
WAM	Warm Asphalt Mix
gal	Nestegallona = 3,785411784 l (engl. US liquid gallon)
p-%	Painoprosentti
t	Tonni = 1000 kg (engl. tonne)
ton	Lyhyt tonni = 907,18474 kg (engl. short ton)

1 Johdanto

1.1 Tausta

1.1.1 Energiatehokas Helsinki

Helsingissä on tehty pitkäjänteistä energiatehokkuuden edistämistyötä jo 1970-luvun alusta ja Helsingin kaupunki on vuodesta 1993 lähtien sitoutunut energiansäästöön useiden kansallisten energiatehokkuussopimusten kautta jo neljän perättäisen sopimuskauden ajan. Nykyisin voimassaoleva kunta-alan energiatehokkuussopimus allekirjoitettiin vuonna 2007 ja on voimassa aina vuoden 2016 loppuun saakka. Sopimus on osa kansallista energiatehokkuussopimusten järjestelmää ja sen tarkoituksena on osaltaan toteuttaa EU:n energiatehokkuusdirektiivin sekä Suomen energia- ja ilmastostrategian vaatimuksia. Helsinki on sopimusjärjestelmässä mukana myös vuokra-asunto-yhteisöjen sekä elinkeinoelämän energiatehokkuussopimuksella. (Helsingin kaupunki 2010, Helsingin kaupunki 2015a).

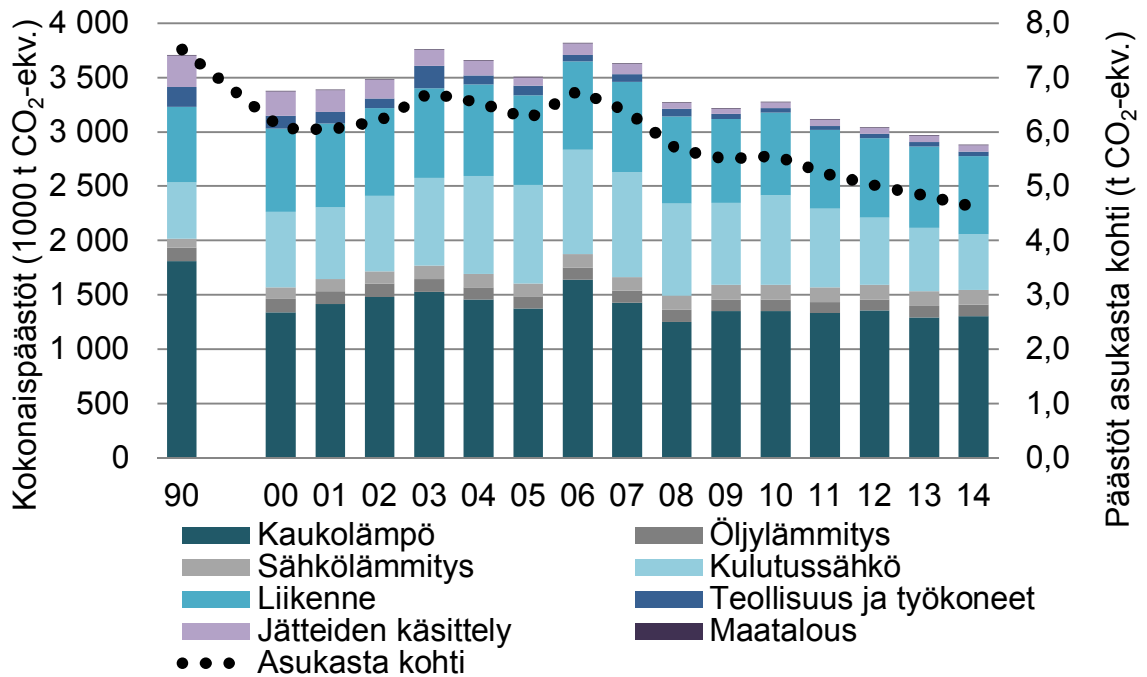
Vuonna 2009 Helsinki liittyi Covenant of Mayors -sopimukseen eli kaupunginjohtajien ilmasto- ja energiasopimukseen, joka on EU-maiden kaupunginjohtajien välinen sitoumus. Päämääränä on vähentää kasvihuonepäästöjä mukana olevissa kaupungeissa vähintään 20 % vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoteen 1990. Sopimus edellyttää muuan muassa energiankäytön toimenpideohjelman laatimista ja sen toteutumisen seuraamista. Lisäksi sopimuksessa painotetaan kaupungin esimerkillisen toiminnan merkitystä sekä kaikkien kaupungin toimielinten liittämistä toimenpiteiden valmistelu- ja toteutustyöhön. (Helsingin kaupunki 2010, Helsingin kaupunki 2014a).

Vuonna 2010 valmistuneessa Helsingin kestävän energiankäytön toimenpideohjelmassa (Sustainable Energy Action Plan, SEAP) Helsingin kaupunki sitoutuu vähentämään kasvihuonepäästöjä kaupunginjohtajien ilmasto- ja energiasopimuksen mukaisesti toiminta-alueilla, jotka ovat sen toimivallan piirissä. Vuonna 2009 ohjelman piirissä olevat kokonaispäästöt olivat noin 9 % pienemmät kuin vuonna 1990, mikä oli saavutettu energiansäästötyön ja energiantuotannon muutosten yhteisvaikutuksella. (Helsingin kaupunki 2010)

Kaupunkialueen kokonaispäästöistä vain noin 14 % aiheutuu suoraan kaupungin oman toiminnan energiankäytöstä. Vaikutus kaupunkialueen kokonaispäästöihin olisi vain noin 3 %, vaikka kaupunki vähentäisi oman toimintansa energiankulutuksesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä yli 20 %. Kuitenkin Helsingin kaupungin toimivallan piirissä on arviolta noin 34 % koko kaupunkialueen hiilidioksidipäästöistä eli toimenpiteiden tulee kohdistua myös kaupungin ulkopuolisille sektoreille. (Helsingin kaupunki 2010)

Vuonna 1990 kasvihuonekaasupäästöjen määrä oli Helsingissä 3703 kt CO₂-ekv. ja vastaava luku vuonna 2014 oli 2879 kt CO₂-ekv. Päästöjen määrä on siis vähentynyt aikavälillä 1990–2014 yli 22 %, mikä tarkoittaa että Helsinki on jo saavuttanut päästövähennystavoitteen. (HSY 2015). Tämä ei kuitenkaan tarkoita, ettei päästöjen vähentämistä jatkettaisi, vaan päinvastoin Helsingin kaupunki on linjannut vuosien 2013–2016 strategiaohjelmassaan tavoitteeksi vähentää hiilidioksidipäästöjä 30 % vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon. Toisin sanoen vuoden 2020 tavoitetta on nostettu kymmenellä prosenttiyksiköllä, koska tavoite saavutettiin ennen määräaikaa. Strategiaohjelmassa painotetaan myös

innovatiivisten hankintojen lisäämistä sekä ympäristönäkökulman huomioon ottamista hankinnoissa. (Helsingin kaupunki 2013). Kuvassa 1 on esitetty Helsingin kokonaispäästöjen kehitystä vuodesta 1990.



Kuva 1. Kasvihuonekaasupäästöt Helsingissä vuonna 1990 ja vuosina 2000–2014 (HSY 2014).

Strategiaohjelman lisäksi Helsingin kaupungin toimintaa ohjaa Helsingin kaupunginvaltuuston vuonna 2012 hyväksymä ympäristöpolitiikka, joka on jaettu pitkään ja keskipitkään aikaväliin. Ympäristöpolitiikassa on asetettu tavoitteita molemmille aikaväleille siten, että pitkän aikavälin tavoitteet tähtäävät vuoteen 2050 ja keskipitkän aikavälin tavoitteet puolestaan noin vuoteen 2020. Ilmastonsuojelun osalta pitkän aikavälin tavoitteeksi on asetettu, että Helsinki on hiilineutraali kaupunki vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteen täyttymistä seurataan säännöllisten raporttien avulla, jolloin toimenpideohjelmalla voidaan muuttaa tarvittaessa. Ympäristöpolitiikassa on asetettu tavoitteita myös hankintojen ja materiaalihankintojen kehittämiseksi. Vuoteen 2015 mennessä 50 % kaupungin hankintaprosesseista tulisi sisältää ympäristökriteerejä ja lisätavoitteena on, että vuoteen 2020 mennessä kaikki kaupungin hankintaprosessit sisältävät ympäristökriteerejä, jotka voivat olla joko ehdottomia vaatimuksia tai vertailuperusteita. (Helsingin kaupunki 2012).

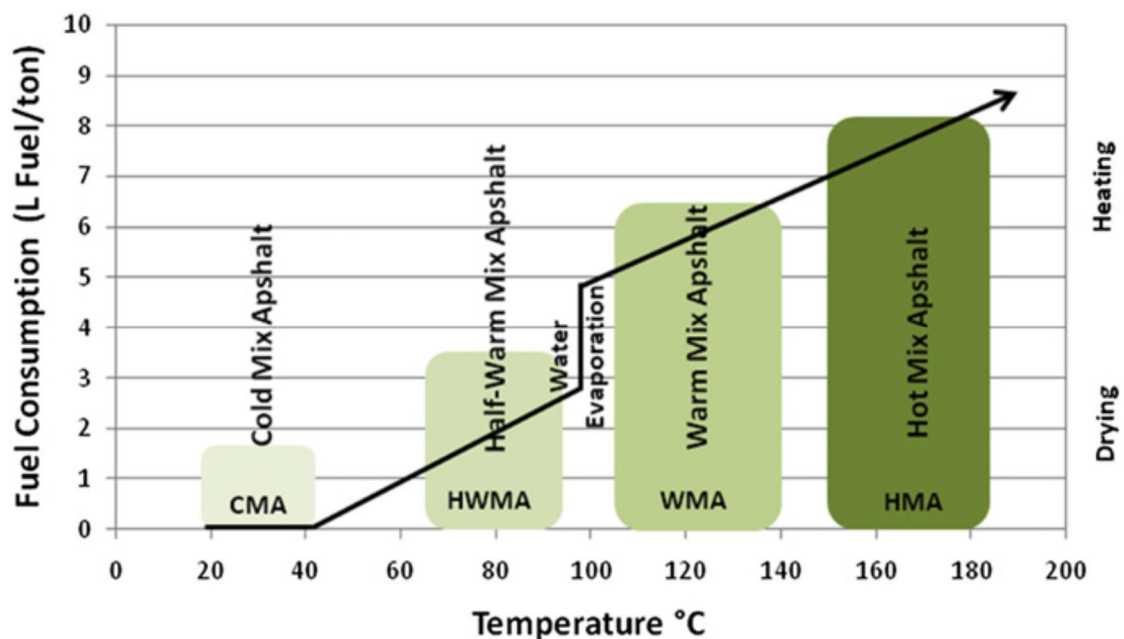
1.1.2 Katujen rakentaminen ja ylläpito Helsingissä

Helsingin kaupungin rakennusvirasto (HKR) vastaa kaupungin katu- ja viheralueista sekä lisäksi toimitilojen suunnittelusta ja rakennuttamisesta. Yksi rakennusviraston viidestä osastosta, katu- ja puisto-osasto, vastaa puolestaan Helsingin katujen ja viheralueiden suunnittelusta, rakentamisesta ja ylläpidosta. Helsingin kaupunki on kuitenkin eriyttänyt varsinaisen rakennus- ja ylläpitotyön pääosin kaupungin omalle tuotantoyksikölle, Staralle eli Helsingin kaupungin rakentamispalvelulle. Kyseessä on siis niin kutsuttu tilaaja–tuottaja-malli, jossa rakennusvirasto toimii tilaajana ja Stara vastaa tilauksen mukaisesta tuotannosta.

Staran organisaatiossa katujen korjaamisesta ja uusien katujen rakentamisesta vastaa pääosin kaupunkitekniikan rakentaminen (KTR) ja puolestaan kunnossapito- sekä hoitotöistä vastaa kaupunkitekniikan ylläpito (KTY). Varsinaiset asfaltointityöt Stara tilaa yksityisiltä urakoitsijoilta vuosittaisen ja erillisiin urakoihin hajautetun kilpailutuksen kautta.

Tarve matalalämpöasfaltin tutkimiselle Helsingissä syntyi, kun rakennusvirasto tilasi Staralta vuonna 2014 päällystystyön, jossa vaatimuksena oli niin kutsutun matalalämpöasfaltin koekäyttö. Koekohteeksi valittiin Vuotie, johon tilattiin päällysteet kahdelta eri urakoitsijalta siten, että vaatimuksena oli valmistuslämpötilan madaltaminen kasvihuonepäästöjen alentamiseksi. Lisäksi kohteelle tehtiin niin sanottu vertailupäällyste, jossa käytettiin perinteistä kuumana sekoitettua asfalttibetonia. Rakennusviraston tilaus matalalämpöasfaltin koekäytölle juontaa juurensa Helsingin kaupungin energiatehokkuuden ja hankintaprosessien parantamistavoitteista.

Matalalämpöasfaltin perinteistä alempi valmistuslämpötila tarkoittaa, että sen valmistuksessa käytetään vähemmän energiaa, mikä vähentää prosessista aiheutuvia kasvihuonepäästöjä. Kuvassa 2 on esitetty matalalämpöasfalttien (WMA ja HWMA) tyypilliset valmistuslämpötilan ja energiankulutuksen arvot verrattuina perinteisiin kuuma-asfaltteihin (HMA) sekä kylmiin asfalttimassoihin (CMA).



Kuva 2. Energiankulutus ja valmistuslämpötila eri asfalttiluokilla (Rubio ym. 2012).

1.2 Ongelman asettelu

1.2.1 Matalalämpöasfaltti Suomessa

Suomessa matalalämpöasfaltin käyttö on vielä melko vähäistä, eikä aiheesta ole julkaistu kattavia tutkimuksia toistaiseksi. Aiheesta on tehty useita tutkimuksia ulkomailla, mutta tutkimusten soveltaminen Suomessa on ongelmallista useasta syystä. Ensinnäkin Suomen sääolosuhteet aiheuttavat päällysteille huomattavasti erilaisia vaatimuksia kuin esimerkiksi Keski- ja Etelä-Euroopassa. Toiseksi useat ulkomaalaiset tutkimukset keskittyvät pääosin tuotteistettujen lisäaineiden tai valmistusmenetelmien vaikutusten selvittämiseen. Näiden

tuotteistettujen matalalämpöasfalttien Suomessa tehdyistä koe-kohteista tai saatavuudesta ei ole tietoa tällä hetkellä. Lisäksi Suomessa matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmät ovat hyvin tarkasti varjeltuja yrityssalaisuuksia, mikä saattaa olla osasyynä tutkimusaineiston puutteelle myös muissa Pohjoismaissa. Suomenkielisen tutkimusaineiston puute lienee myös syynä matalalämpöasfalttien vähäiselle käytölle. Toisin sanottuna Suomessa kierretään kehää, jossa uusien innovaatioiden käyttöönottoa pelätään, koska aihetta ei ole tutkittu, mikä estää aiheen riittävän tutkimisen käytännönläheisesti.

1.2.2 Helsingin päällystystöistä aiheutuvat päästöt

Asfalttiasemien toiminta edellyttää ympäristölupaa, jossa kuvataan toiminnan laajuus ja asetetaan raja-arvoja esimerkiksi vuosituotannon osalta. Valtioneuvoston asetus asfalttiasemien ympäristösuojeluvaatimuksista (Vna 846/2012) edellyttää, että toiminnanharjoittajan tulee tehdä toiminnastaan vuosiraportti, josta käyvät ilmi muun muassa käytettyjen polttoaineiden laatu ja kulutus sekä laskennalliset tai mitatut rikkidioksidin-, typenoksidin-, hiilidioksidin ja hiukkasten vuosipäästöt.

Helsingin kaupungin toimivallan piirissä olevien asfalttimassan valmistuksesta johtuvien päästöjen mittaaminen on kuitenkin ongelmallista, koska päällysteurakoissa toimii useita eri asfalttimassaa valmistavia tahoja, joiden asfalttiasemilla valmistetaan asfalttimassoja myös muihin kuin Helsingin kaupungin urakoihin. Vaikka pääkaupunkiseudulla toimivien asfalttiasemien vuosipäästöt olisivat tiedossa, ei niistä voida erotella tarkasti Helsingin kaupungin toimivallan piirissä olevia päästöjä.

Matalalämpöasfaltit ovat kuitenkin perinteisiä asfalttibetoneita kalliimpia, mikä tarkoittaa tilaajan kannalta, että matalalämpöasfalteilta voidaan odottaa päästövähennyksiä vastineeksi korkeammalle hinnalle. Koska päästöjen mittaaminen on mahdotonta, toteutuneita päästövähennyksiä täytyy arvioida esimerkiksi laskelmien avulla.

1.3 Tavoitteet

Tämän työn tavoitteena oli tutkia matalalämpöasfaltin kestävyyttä Helsinkiin tehtyjen koe-kohteiden avulla. Koe-kohteiden ja vertailuosuuden perusteella arvioidaan matalalämpöasfalttien ja perinteisten asfalttibetonien (AB) välisiä kestävyyseroja.

Työssä selvitettiin kuinka paljon hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää käyttämällä matalalämpöasfalttia perinteisen AB-massan sijasta. Työssä selvitettiin myös matalalämpöasfaltin päästövähennysten vaikutusta koko Helsingin ilmastotavoitteeseen sekä arvioitiin kompensoivatko päästövähennykset mahdollista kestävyysalantumista.

Lisäksi selvitettiin miten matalalämpöasfaltin mahdollinen käyttö vaikuttaa urakoiden kokonaishintaan sekä mikä on päästöjen vähentämisen taloudellinen kokonaisvaikutus eli käytännössä kuinka monta euroa yhden hiilidioksidiekvivalenttiyksikön (CO₂-ekv.) suuruinen päästövähennys maksaa.

Työn tavoitteena oli myös esittää suositus tilaajaorganisaatiolle matalalämpöasfalttien käytömahdollisuuksista perinteisten AB-massojen korvaajina. Suositus pohjautuu työssä havaittuihin tuloksiin ja lisäksi arvioitiin myös mahdollisia riskejä, joita korvaamisesta saattaa aiheutua.

1.4 Aiheen laajuus ja rajaukset

Työssä keskitytään perinteisten AB-massojen ja niitä vastaavien matalalämpöasfalttien tutkimiseen. Tutkimustuloksia ei voida yleistää esimerkiksi kivimastiksi- (SMA) tai valuasfaltteille (VA) niiden sideainepitoisuuden ja kiviaineksen raekokojakauman eroavaisuuksien syystä. Tässä työssä AB-massoilla tarkoitetaan yleisesti asfalttibetoneita eli kulutuskerroksen asfalttibetonien lisäksi kantavan (ABK) sekä sidekerroksen (ABS) asfalttibetoneita. Niin sanotut tiiviit asfalttibetonit (ABT) rajataan pois työstä niiden tiukan tyhjätilavaatimuksen takia. Helsingin kaupungin päällystystöissä AB-massoilla on määrällisesti selvästi suurin osuus.

Kestävyyden arviointiin käytettävän tutkimustiedon määrä on hyvin rajallinen, sillä vanhin koekohteista on tehty syksyllä 2014, mikä rajoittaa empiiriset kestävyystarkastelut vain lyhyelle aikavälille. Kestävyyttä pyritään arvioimaan vertaamalla koekohteen nastarengaskulumista vertailuosion kulumiseen.

Suomessa matalalämpöasfalttien valmistuksessa hyödynnetään pääosin vaahdotusmenetelmiä, minkä takia lisäaineiden vaikutuksia ei ole mahdollista vertailla koekohteiden perusteella. Vaahdotusmenetelmän suosio ohjaa osaltaan myös kirjallisuusselvityksen osioiden laajuutta eli työssä keskitytään etenkin vaahdotusmenetelmien vaikutusten selvittämiseen. Matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmät ovat Suomessa liikesalaisuuksia, joten eri tekniikoiden vertailua on mahdoton toteuttaa.

Mahdollisten päästövähennysten selvityksessä ei oteta huomioon asfalttimassojen kuljetuksesta aiheutuvia päästöjä. Matalalämpöasfalttien valmistusteknologioiden yleistyessä asfalttimassoja voidaan valmistaa samoilla asfalttiasemilla kuin perinteisiä asfalttimassoja eli kuljetusetiisyydet eivät muutu.

1.5 Käytetyt tutkimusmenetelmät ja hypoteesit

Työn kirjallisuusselvityksessä keskityttiin matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmien sekä niiden toiminnallisten, ekologisten ja taloudellisten vaikutusten esittämiseen.

Työssä tutkittiin kahden koekohteen Vuotien ja Kallvikintien päällystämistä matalalämpöasfaltilla, kolmen urakoitsijan toimesta kesällä 2014 ja 2015. Molemmissa kohteissa käytettiin AB 22 -asfalttimassaa katujen suuren liikennemäärän takia.

Matalalämpöasfalttien kestävyyttä ja sen vertailua perinteisiin AB-massoihin tutkittiin kenttämittausten ja laboratoriokokeiden avulla. Laboratoriokokeiden osalta työssä tutkittiin asfalttimassojen koostumusta sekä päällysteen kestävyyttä, mutta suurimmassa roolissa olivat poranäytteiden tyhjätilatutkimukset. Kenttämittausten avulla selvitettiin matalalämpöasfaltin nastarengasurautumista verrattuna perinteiseen AB-päällysteeseen sekä toteutuneita matalalämpöasfaltin levityslämpötiloja, joita verrattiin päällysteen tyhjätilatutkimuksiin.

Päästövähennysten arviointi toteutettiin kirjallisuusselvityksen sekä teoreettisten laskutoimitusten avulla, koska Helsingin kaupungin toimivallan piirissä olevien päästöjen mittaaminen on liki mahdotonta. Päästövähennyslaskennassa oletetaan, että polttoaineenkulutus asfalttimassojen valmistuksessa on suoraan verrannollinen valmistuksesta aiheutuviin kasvihuonepäästöihin.

Tutkimusten perusteella pyritään arvioimaan matalalämpöasfaltin kestävyyttä Suomen olosuhteissa verrattuna perinteisiin asfalttibetoneihin. Lisäksi laskelmien tarkoituksena on todentaa, että matalalämpöasfaltin käyttö todella vähentää kasvihuonepäästöjä.

Tässä työssä asfalttimassoista käytetään seuraavia lyhenteitä, jotka ovat käännöksiä englanninkielisistä hyvin yleisesti käytetyistä lyhenteistä.

- KA, kuuma-asfaltti (HMA, Hot Mix Asphalt)
- MLA, matalalämpöasfaltti (WMA, Warm mix asphalt)
- PMLA, puolimatalalämpöasfaltti (HWMA, Half Warm Mix Asphalt)
- KyA, kylmäasfaltti (CMA, Cold Mix Asphalt)

2 Matalalämpöasfaltti ja sen valmistusmenetelmät

2.1 Matalalämpöasfaltin kehitys

Asfalttimassan valmistaminen matalammassa lämpötilassa ei ole varsinaisesti uusi keksintö, sillä jo vuonna 1956 Yhdysvalloissa yritettiin valmistaa asfalttimassaa, jossa sideaine oli vaahdotettu kuumen höyryn avulla. Kokeilun toteutti professori Ladis Csanyi Iowan yliopistossa ja sen jälkeen vaahdotusteknologiaa on käytetty useissa maissa myös Euroopassa. (Zaumanis 2010).

Vuonna 1968 Mobil Oil Australia, joka oli saanut haltuunsa patentin Csanyin keksinnölle, muokkasi alkuperäistä prosessia korvaamalla kuumen höyryn kylmällä vedellä, mikä teki prosessista käytännöllisemmän. Energiayhtiö Chevron kehitti 1970-luvulla suunnittelumenetelmiä erityyppisille asfalteille, joissa käytettiin emulsiosideainetta. Chevron julkaisi vuonna 1977 käytännönläheisen ohjeistuksen ”Bitumuls Mix Manual”, joka sisältää tietoa bitumiemulsiolla sidottujen asfalttimassojen luokituksesta, suunnittelusta ja tuottamisesta. Tämän jälkeen myös muita samantyyppisiä ohjeistuksia julkaistiin 1970- ja 1980-luvulla. (Chowdhury & Button 2008).

Seuraava merkittävä vaihe matalalämpöasfaltin kehityksessä tapahtui vuonna 1995 kun Shell Bitumen patentoi kaksikomponenttimenetelmän, jossa hyödynnetään pehmeää sekä kovaa bitumia. Menetelmästä kehittyi hieman myöhemmin vielä nykyään tunnettu WAM-Foam matalalämpöasfalttimenetelmä. Samoihin aikoihin Euroopassa alettiin markkinoida parafiinipohjaista lisäainetta tuotenimellä Sasobit, jonka alkuperäinen tarkoitus oli työstettävyyden parantaminen. Myöhemmin Sasobit-lisäainetta alettiin käyttää myös matalalämpöasfaltin valmistuksessa. (Chowdhury & Button 2008). Matalalämpöasfalttien valmistukseen oli 2000-luvun taitteessa olemassa useita erilaisia orgaanisia lisäaineita sekä vaahdotusmenetelmiä, joista osassa valmistuslämpötila oli jopa alle 100 °C. Myös erilaisten kemiallisten lisäaineiden käyttö matalalämpöasfalttien valmistuksessa aloitettiin. (Zaumanis 2010).

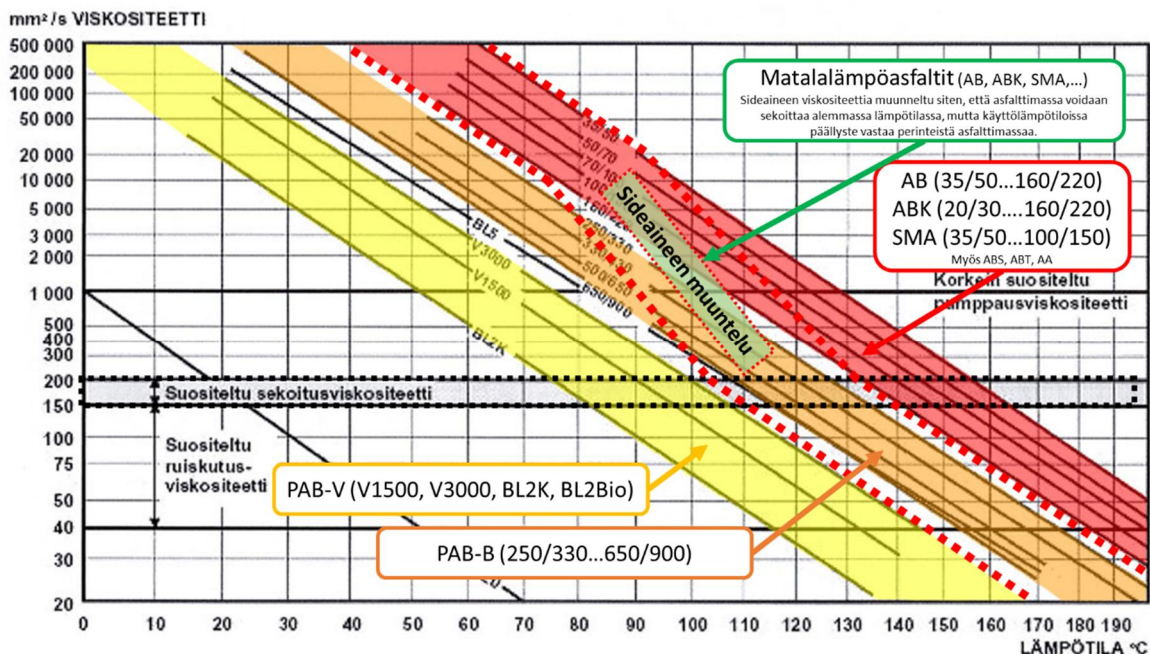
Modernien matalalämpöasfalttimenetelmien kehitystyön alusta asti aiheesta on tehty useita tutkimuksia, jotka koskevat etenkin mahdollisten etujen todentamista sekä matalalämpöasfalttien kestävyyttä verrattuna perinteisiin asfalttimassoihin. Ensimmäiset raportit aiheesta on julkaistu Euroopassa 1990-luvun puolivälissä ja vuodesta 2002 testejä ja kenttäkokeita on toteutettu myös Yhdysvalloissa. (Zaumanis 2010).

Sana matalalämpöasfaltti on käännös englanninkielistä sanoista Warm Mix Asphalt (WMA), mutta aiheeseen liitetään usein myös termit LEA (Low Energy/Emission Asphalt), LTA (Low Temperature Asphalt) ja WAM (Warm Asphalt Mix). Tässä yhteydessä on kuitenkin pidettävä mielessä, että esimerkiksi WAM on Shell Brands International AG:n rekisteröity tuotemerkki (IPCentral GmbH 2015a) ja LTA puolestaan viittaa läheisesti Nynas AB:n rekisteröityyn tuotemerkkiin LT-Asphalt (IPCentral GmbH 2015b). Lyhenteellä LEA tarkoitetaan taas vaahdotusprosessia, johon ranskalainen LEA-CO yritys on myös kehittänyt asfalttiasemaan asennettavan tuotantovarusteen (Zaumanis 2010). Rekisteröityjen tavaramerkkien tai niihin viittaavien lyhenteiden sekä prosessien lyhenteiden käyttöä yleisinä lyhenteinä matalalämpöasfalteille tulisi kuitenkin välttää.

2.2 Matalalämpöasfaltti ja sen valmistaminen

Matalalämpöasfaltilla tarkoitetaan asfalttimassaa, joka valmistetaan tyypillisesti kymmeniä celsiusasteita matalammassa lämpötilassa kuin perinteiset asfalttimassat kuitenkin siten, että kiviainekset kuivataan. Alentamalla valmistuslämpötilaa voidaan vähentää energiankulutusta ja siten myös valmistuksesta aiheutuvia kasvihuonepäästöjä. Pelkkä valmistuslämpötilan laskeminen aiheuttaa kuitenkin hyvin todennäköisesti ongelmia asfalttimassan valmistuksessa, sillä bitumin viskositeetti ei ole välttämättä riittävän alhainen ja kiviaineksen kuivaus saattaa jäädä kesken. Liian korkea viskositeetti tai kosteus voivat estää kiviaineksen täydellisen peittymisen, mikä vaikuttaa päällysteen elinikään huonon tartunnan takia. Myös asfalttimassan työstettävyys ja tiivistettävyys kärsii liian korkeasta viskositeetista.

Matalalämpöasfalttien valmistuksessa hyödynnetään kuitenkin erilaisia teknologioita ja lisäaineita, joiden avulla sideainetta muunnellaan siten, että asfalttimassa voidaan valmistaa alemmassa lämpötilassa ja sen työstettävyys sekä tiivistyminen vastaavat perinteistä asfalttimassaa. Kuvassa 3 on esitetty perinteisissä asfalttimassoissa käytettyjen sideaineiden kinemaattisia viskositeetteja lämpötilan funktiona sekä matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmien toimintaperiaate sideaineen muuntelun osalta. Kuvan 3 mukainen sideaineen muuntelu voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä vaahdotusteknologiaa, jonka avulla sideaineen viskositeettia voidaan laskea väliaikaisesti valmistuksen yhteydessä. Valmistuslämpötilaa voidaan laskea myös käyttämällä pehmeämpää sideainetta, jonka käyttölämpötilojen viskositeettia nostetaan esimerkiksi vahalisäaineiden avulla. Matalalämpöasfaltin valmistuksessa on mahdollista myös yhdistellä erilaisia teknologioita ja lisäaineita, kuten tartukkeita, parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Erilaisia matalalämpöasfaltin valmistusmenetelmiä voidaan soveltaa käytännössä kaikille asfalttityypeille ja lopullisen tuotteen on tarkoitus täyttää asetetut vaatimukset elinkaaren loppuun asti.



Kuva 3. Sideaineiden viskositeetteja lämpötilan funktiona sekä matalalämpöasfalttien sideaineen muuntelun toimintaperiaate (muokattu lähteestä PANK ry 2011).

Perinteisten asfalttimassojen ja matalalämpöasfalttien valmistuslämpötilojen ero vaihtelee hyvin paljon esimerkiksi perinteisen massan valmistuslämpötilan, matalalämpöasfaltin valmistusteknologian sekä käyttökohteen mukaan. Lämpötilaeron yleistäminen yhdelle vaihteluvälille onkin melko hankalaa ja tästä syystä myös ulkomaisten tutkimusten vaihteluväleissä on eroja. Matalalämpöasfaltin ja perinteisen kuuma-asfaltin valmistuslämpötilan eron maksimiksi ilmoitetaan kuitenkin usein noin 40 °C (Chowdhury & Button 2008, EPA 2014). Toisaalta valmistuslämpötilojen eroksi on ilmoitettu jopa 20 - 55 °C (D'Angelo ym. 2008) tai jopa 40 % (Hurley & Prowell 2006a), mikä tarkoittaa, että valmistuslämpötila saattaa olla jopa alle 100 °C. Matalalämpöasfaltin valmistuslämpötilan alarajana käytetään kuitenkin usein noin 100 °C (Chowdhury & Button 2008, Zauberman 2010), mikä erottaa matalalämpöasfaltin puolimatalalämpöasfalteista (D'Angelo ym. 2008). PMLA-massat valmistetaan samankaltaisten prosessien tai lisäaineiden avulla kuin MLA-massat, mutta PMLA-prosesseissa kiviaines jätetään tarkoituksellisesti kosteaksi, minkä syystä valmistuslämpötila pidetään 100 celsiusasteen alapuolella.

Kirjallisuustutkimuksen yhteydessä havaittiin, että matalalämpöasfalttien valmistukseen on kehitetty yli 40 erilaisia tuotetta ja prosessia. Osa näistä menetelmistä on hyvin samantapaisia keskenään, mutta ne tunnetaan eri nimillä pienten eroavaisuuksien ja eri valmistajien vuoksi. Uusia ja vanhoja valmistusmenetelmiä kehitetään jatkuvasti ja joissakin tapauksissa vanhoja menetelmiä nimetään uudestaan, mikä voi aiheuttaa sekaannusta menetelmien välille. Ilmoitettujen valmistuslämpötilojen tai niiden erojen havaittiin joskus olevan hieman epäuskottavia tai epäloogisia. Esimerkiksi erään lisäaineen yhteydessä ilmoitettiin alle 100 °C valmistuslämpötila, joka on toisten lähteiden perusteella mahdottoman alhainen, sillä lisäaineen toiminta perustuu korkeampaan lämpötilaan. Myös yksikkömuunnoksissa havaittiin virheitä, sillä eräessä lähteessä valmistuslämpötilojen ero oli muutettu °F:sta suoraan °C:ksi, mikä aiheutti liian pieniä arvoja, koska kyseessä on lämpötilaero eikä pelkkä lämpötila.

Matalalämpöasfaltin valmistusmenetelmät luokitellaan tavallisesti kolmeen eri luokkaan, jotka ovat orgaaniset lisäaineet, kemialliset lisäaineet sekä vaahdotus, joka puolestaan voidaan jakaa vesi-injektiolla tai vettä sisältävillä aineilla toteutettuihin prosesseihin. Joissakin prosesseissa menetelmiä voidaan myös yhdistellä. Suullisten keskustelujen perusteella Suomessa matalalämpöasfaltin valmistuksessa on hyödynnetty lähinnä vaahdotusmenetelmää, mutta myös muut menetelmät tai yhdistelmät ovat mahdollisia.

Kappaleissa 2.3, 2.4 ja 2.5 esitetään vain valmistusmenetelmien pääperiaatteita. Lisäksi liitteessä 1 on esitetty valmistusmenetelmiä ja niiden ominaisuuksia taulukoituina sekä tarkempia selostuksia menetelmäkohtaisesti.

2.3 Vaahdotusmenetelmien periaate

Vaahdotuksessa kuuman sideaineen sekaan syötetään pieni määrä vettä, joka höyrystyy sekä kasvattaa sideaineen tilavuutta ja siten myös alentaa sen viskositeettia lyhytaikaisesti. Sideaineen tilavuuden kasvu edistää kiviaineksen peittymistä ja jäljelle jäävä kosteus puolestaan parantaa työstettävyyttä ja tiivistymistä kohteella. (EPA 2014). Vaahdotuksessa on otettava huomioon, että seokseen lisätään riittävästi vettä, jotta sideaineen vaahtoutuminen saadaan aikaiseksi. Vettä voidaan kuitenkin lisätä liikaa, mikä aiheuttaa tartuntaongelmia kiviaineksen ja sideaineen välille. Kosteusvaurioiden välttämiseksi osa valmistajista suosittelee tartukkeiden lisäämistä massan sekoituksen yhteydessä. (Zauberman 2010).

Vesi-injektiolla toteutetussa vaahdotuksessa kuuman sideaineen sekaan ruiskutetaan pieni määrä vettä suuttimien läpi. Vesi höyrystyy ja laajentaa sideainetta merkittävästi, mutta vain väliaikaisesti. Osa vedestä säilyy kuitenkin höyrynä massan seassa, mikä alentaa viskositeettia ja edistää tiivistymistä. Asfalttimassan jäähtyessä veden määrä vähenee merkityksettömäksi ja sideaine palautuu täten normaaliksi. (EAPA 2014). Yhden asfalttitonnin valmistaminen vesi-injektiota hyödyntäen kuluttaa vain noin litran vettä (Prowell ym. 2012).

Vesi-injektiolla toteutettuja vaahdotusprosesseja:

- Accu-Shear
- AQUABlack® WMA
- AquaFoam®
- Double Barrel® Green
- Eco-Foam II (Static Inline Vortex Mixer)
- LT Asphalt®
- Meeker Warm Mix
- Terex® WMA
- Tri-Mix Warm Mix Injection
- Ultrafoam GX2 (Green Machine)
- WAM® Foam.

Vettä sisältävillä lisäaineilla tarkoitetaan lähinnä luonnollisia tai synteettisiä zeoliitteja, kuten Advera® WMA ja Aspha-Min®, jotka ovat alumiinisilikaatteja ja sisältävät noin 18 – 21 % vettä kiteisessä muodossa (Perkins 2009). Zeoliitit vapauttavat niihin sitoutuneen veden yli 100 °C lämpötilassa, mikä aiheuttaa sideaineessa kontrolloidun vaahtoutumisen. Sideaineen vaahtoutuminen edistää massan työstettävyyttä ja myös massan tiivistettävyyttä säilyy tavanomaisena massan lämpötilan ollessa jopa noin 30 °C matalampi kuin vastaavan kuuma-asfaltin. (EAPA 2014). Vaahdotus voidaan toteuttaa myös käyttämällä kosteaa kiivainesta tai hienoaainesta.

Vettä sisältäviin raaka- tai lisäaineisiin perustuvia vaahdotusprosesseja:

- Advera® WMA & Aspha-Min®
- LEA Low Energy Asphalt / Low Emission Asphalt
- LEAB® Low Energy Asphalt Concrete
- KGO-III-menetelmä
- 2-Phase Mixing -menetelmä.

2.4 Orgaanisten lisäaineiden periaate

Orgaanisten lisäaineiden tarkoituksena on alentaa sideaineen viskositeettia tietyn lämpötilan ylittyessä. Tyypillisesti näiden lisäaineiden sulamispiste on matalampi kuin kuuman asfalttimassan valmistuslämpötila eli massaa valmistettaessa lisäaine alentaa sideaineen viskositeettia, mikä mahdollistaa matalamman valmistuslämpötilan. (Perkins 2009). Lisäaineen valinnassa tulee kuitenkin ottaa huomioon, ettei sen sulamispiste ole pienempi kuin odotettu käyttölämpötila, koska alhainen sulamispiste voi johtaa pysyvään deformaatioon. Lisäksi valinnassa tulee ottaa huomioon asfalttimassan haurastumisen mahdollisuus matalissa lämpötiloissa. (D'Angelo ym. 2008). Käyttölämpötilan pysyessä sulamispisteen alapuolella orgaaniset lisäaineet puolestaan parantavat päällysteen deformaatiokestävyyttä (Perkins 2009).

Orgaaniset lisäaineet ovat tyypillisesti vahoja tai rasvahappoamideja. Vahojen vaikutuksista bitumin ominaisuuksiin on ollut ristiriitaisia mielipiteitä jo pitkään. Bitumi sisältää lähes poikkeuksetta luonnollisia vahoja ja niiden negatiiviset vaikutukset liittyvät usein kiteytymiseen ja sulamispisteeseen, mutta erityyppiset vahat vaikuttavat bitumin ominaisuuksiin eri tavoin. Vahojen ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen vaikuttaa puolestaan keskeisesti hiiliketjujen pituus sekä niiden kemiallinen rakenne yleensä. (Edwards 2005). Hiiliketjujen pituus merkitään kirjaimella C ja alaindeksillä, joka kertoo kuinka monta hiiliatomia ketjussa on.

Bitumiin lisättävien tai siinä jo olevien vahojen haitallisuuden selventämistä varten vahat voidaan luokitella kolmeen luokkaan eli makrokiteisiin, mikrokiteisiin ja amorfisiin. Makrokiteisten vahojen pituus on tyypillisesti noin C_{30} ja niistä muodostuvat kiteet ovat suurempia kuin mikrokiteisten vahojen, jotka ovat pituudeltaan C_{40} tai yli. Suurten vahakiteiden muodostuminen nähdäänkin ongelmallisimpana, mutta nykyaikaisten bitumien vahat ovat usein mikrokiteisiä tai amorfisia. (Edwards 2005). Matalalämpöasfaltin valmistuksessa lisäaineina käytetyt vahat ovat yleensä Fisher-Tropsch- (FT) tai montaanivahoja, joiden hiiliketjujen pituus on tyypillisesti suurempi kuin C_{45} ja sulamispiste yli $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Synteettiset alifaattiset FT-parafiinivahat, kuten Sasobit®, valmistetaan katalyytin avulla kuumentamalla hiiltä tai maakaasua veden kanssa $180 - 280\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilaan. Montaanivaha on puolestaan fossiilinen kasvivaha, jota voidaan eristää tietyn tyyppisestä ligniitistä tai ruskohiilestä liuottamalla. Se koostuu pitkäketjuisista estereistä, hapoista, alkoholeista, ketoneista, hiilivedyistä ja hartseista. (D'Angelo ym. 2008). Montaanivahan kemiallinen rakenne on siis huomattavasti monimutkaisempi kuin FT-vahojen, jotka koostuvat pääosin vain pitkäketjuisista hiilivedyistä. Vahat, jotka sisältävät monihaaraisia hiiliketjuja, aromaattisia tai alisyklisiä komponentteja tai heteroatomeja eivät kiteydy helposti ja ne mielletäänkin amorfisiksi, taipuisiksi tai elastisiksi (Edwards 2005). Vaikka montaanivahaa onkin käytetty valuasfalttimassojen valmistuksessa, MLA-massan valmistuksessa suositellaan käytettävän sen sijaan montaanivahan ja rasvahappoamidien seosta, kuten esimerkiksi lisäainetta Asphaltan B® (D'Angelo ym. 2008).

Rasvahappoamideja on käytetty bitumin viskositeetin modifioinnissa jo useiden vuosien ajan etenkin vesikattotöissä. Kuten FT- ja montaanivahat rasvahappoamidit nostavat sideaineen jäykkyyttä korkeissa lämpötiloissa, mutta vaikuttavat myös sideaineen ominaisuuksiin matalissa lämpötiloissa. (D'Angelo ym. 2008). Rasvahappoamidit valmistetaan synteettisesti amiineista ja rasvahapoista ja niiden sulamispiste on tyypillisesti $140 - 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä (Rubio ym. 2011).

Orgaanisia lisäaineita ovat muun muassa:

- Asphaltan® A & Romonta N
- Asphaltan® B
- Hydrogreen® S (BituTech PER, BituTech RAP®, Astech)
- Sasobit® & Sasoflex®
- LEADCAP Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement
- Licomont® BS 100 & Sübit
- SonneWarmix™ (AD-RAP, ECOBIT, Sonneborn AR)
- Thiopave™ (SEAM Sulfur Extended Asphalt Modifier)
- 3E LT (Ecoflex).

2.5 Kemiallisten lisäaineiden periaate

Kemiallisia lisäaineita käytetään usein valmiina seoksena, joka sisältää useita erilaisia lisäaineita. Nämä lisäaineet ovat usein emulsioaineita, tensidejä, polymeerejä sekä aineita, joiden tehtävänä on parantaa kiviaineksen peittymistä, massan työstettävyyttä ja tiivistettävyyttä sekä sideaineen tarttuvuutta. Lisäaineet syötetään massaan emulsiona tai lisätään sideaineen sekaan valmistusprosessissa, mikä vaatii vain vähäisiä muutoksia asfalttiasemaan. (Zaumanis 2010). Yleisesti kemiallisten lisäaineiden tarkoituksena on toimia tartukkeina, mutta lisäaineiden tarkkoja koostumuksia ei ole tyypillisesti ilmoitettu ja niiden toimintaperiaate valmistuslämpötilan laskemisessa vaihtelee. Esimerkiksi vettä sisältävien liuosten tai emulsioiden vesi höyrystyy sekoitusvaiheessa, mikä vastaa vaahdotusmenetelmien toimintaperiaatetta. Puolestaan jotkut kemialliset lisäaineet sisältävät esimerkiksi vahoja ja polymeerejä, mikä tarkoittaa, että niiden toimintaperiaate vastaa osittain orgaanisia lisäaineita. Myös erilaiset teknologioiden yhdistelmät ovat mahdollisia. Valmistuslämpötilan muutos ja muut vaikutukset vaihtelevat käytettävän lisäaineen tai tuotteen mukaan.

Kemiallisia lisäaineita ovat muun muassa:

- Evotherm®
- Cecabase RT®
- HyperTherm / QualiTherm (Iterlow-T)
- Rediset WMX / Rediset LQ
- ZycoTherm.

2.6 Suomessa käytetyt valmistusmenetelmät

Suomessa matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmät ovat hyvin tarkasti varjeltuja yritys-salaisuuksia, eikä niitä ole myöskään tutkittu aiemmin Suomessa. Muutamia kohteita on kuitenkin päällystetty, mutta niistä on yleensä julkaistu vain lyhyitä lehtiartikkeleita. Suomessa käytettyjen MLA:n valmistusmenetelmien selvitys on tästä syystä lähinnä spekulatiivista tai päätelmiin perustuvaa.

Green Asphalt on NCC Roads Oy:n valmistama MLA-tuote, jonka valmistuslämpötilaksi on ilmoitettu 120 – 140 °C. Ensimmäinen Green Asphaltin valmistusasema otettiin käyttöön Suomessa vuonna 2011, mutta tuotetta on käytetty Ruotsissa jo 2000-luvun alusta kuntien ja valtion tieverkon päällystystöissä. (HINKU-foorumi 2014). Norjalaisen LTA2011-tutkimusraportin mukaan menetelmässä käytetään amiineilla muokattua sideainetta, joka sekoitetaan kiviaineksen kanssa ennen hienoaineksen lisäämistä. Asfalttimassaseoksen lämpötilaa lasketaan lisäämällä sen sekaan asfalttirouhetta. Green Asphalt -menetelmän avulla valmistuslämpötilaa voidaan laskea jopa 40 °C. (FAV 2011). Asfalttirouheen lisääminen lämpötilan alentamiseksi tarkoittaa mahdollisesti, että asfalttirouhetta ei kuivata vaan sen kosteuden annetaan vaahdottaa seoksen sideainetta, jolloin myös asfalttimassan työstettävyys ja tiivistyminen paranee. Lehtipuun (1983) mukaan ammoniakista johdetut alkyyliamiinit ovat yleisesti käytettyjä tartukkeita. Amiinit koostuvat pitkäketjuisesta hiilivedystä ja aminoryhmästä tai -ryhmistä. Hiilivetyketju liukenee sideaineeseen ja aminoryhmät puolestaan tarttuvat voimakkaasti kiviainekseen.

Lemminkäinen on tehnyt kokeiluja vaahdotetun sideaineen kanssa jo 1980-luvulla, jolloin he havaitsivat, että vaahdotuksen avulla voidaan laskea asfalttimassan valmistuslämpötilaa. Menetelmien kehityttyä Lemminkäinen valmisti vuonna 2004 asfalttimassaa noin 130 – 140

°C:n lämpötilassa perinteisen 160 °C:n sijaan. (Paasikangas-Tella 2014). Lemminkäisen matalalämpöasfaltti tunnetaan nimellä LMK foam. LTA2011-tutkimusraportin mukaan myös LMK foam -menetelmässä käytetään amiineilla muokattua sideainetta, jota syötetään muuten perinteisellä tavalla valmistetun massan sekaan vaahdotettuna. Menetelmän avulla valmistuslämpötilaa voidaan laskea jopa 40 °C. (FAV 2011).

Myös Asfalttikallio Oy valmistaa matalalämpöasfalttia Suomessa, mutta yrityksen valmistusmenetelmästä ei ole mitään tietoa saatavilla, vaikka tämän diplomityön yksi koekohteista oli yrityksen MLA:n pilottikohde.

2.7 Matalalämpöasfaltin mahdolliset käyttörajoitukset

Matalalämpöasfaltin valmistaminen vaatii muutoksia valmistusprosessiin. Muutokset tarkoittavat yleisesti normaalin valmistuslämpötilan alentamista, bitumin vaahdottamista ja erilaisten lisäaineiden käyttöä, mikä saattaa aiheuttaa ristiriitoja vallitsevien vaatimusten tai ohjeistuksien kanssa. Ristiriitojen tarkka selvittäminen on kuitenkin täysin prosessikohtaista ja tässä kappaleessa esitetäänkin mahdollisia rajoituksia yleistetyti.

Asfalttinormit

PANK ry:n asfalttinormeissa (2011) on esitetty asfalttimassan sekoituslämpötilalle bitumi-laadusta riippuvat vaihteluvälit, mutta myös poikkeavien sekoituslämpötilojen käyttö sallitaan, jos tuotteen laatuvaatimukset täyttyvät. Lisäksi käytettäessä emulgoitua tai vaahdotettua bitumia tai lisäaineita voidaan käyttää erilaisia lämpötiloja, mikä tarkoittaa käytännössä, että asfalttinormeissa ei rajoiteta matalalämpöasfalttien alempaa valmistuslämpötilaa. Mahdollisten lisäaineiden käyttö on asfalttinormien mukaan kuitenkin aina dokumentoitava. Asfalttinormeissa asetetut sekoituslämpötila-alueet valituille tiebitumeille on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Massan lämpötilarajat asfalttiasemalla (muokattu lähteestä PANK ry 2011).

Bitumin luokka	Lämpötila °C
35/50	160 – 200
50/70	150 – 190
70/100	140 – 180
100/150, 160/220	130 – 170
250/330, 330/430	120 – 160

Asfalttinormeissa on asetettu taulukosta poikkeavia lisävaatimuksia SMA- ja VA-massoille sekä gilsoniittia sisältäville massoille, mutta myös niistä voidaan poiketa edellä mainituista syistä.

CE-merkintä

Heinäkuusta 2013 alkaen rakennustuotteilta, jotka kuuluvat harmonisoidun tuotestandardin soveltamisalaan, on vaadittu CE-merkintä. Rakennustuotteen valmistaja vakuuttaa CE-merkinnällä, että tuotteen ominaisuudet ovat harmonisoidun tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen arvioinnin (ETA) mukaiset. Tuotteille, joilla ei ole harmonisoitua tuotestandardia, voidaan hankkia CE-merkintä käyttäen ETA:a, joka on tarkoitettu erityisesti uusille, innovatiivisille tuotteille. CE-merkki ei ole kuitenkaan laatumerkki, vaan sen tavoitteena on parantaa rakennustuotteiden vertailukelpoisuutta. (Ympäristöministeriö 2015).

Myös asfalttinormeihin on kirjattu rakennustuoteasetusten tulkinnanvaraisuuden syystä lisävaatimus, jonka mukaan ”*Asfalttimassan ja siinä käytettävien materiaalien, joilla on harmonisoitu tuotestandardi, tulee olla CE-merkittyjä*” (PANK ry 2013).

Suomessa asfalttibetonien CE-merkinnän pohjana on eurooppalainen standardi SFS-EN 13108-1 + AC, jossa on määritetty vaatimuksia käytettäville raaka-aineille sekä asfalttimassalle. Standardissa vaaditaan, että käytettävien raaka-aineiden soveltuvuus on varmistettu yhdellä tai useammalla seuraavista tavoista:

- Eurooppalainen standardi
- Eurooppalainen tekninen hyväksyntä
- Materiaalien hyväksytystä käytöstä asfaltissa on olemassa dokumentoitua tietoa. Soveltuvuus osoitetaan tutkimuksen ja kokemusten perusteella.

Lisähuomiona mainitaan kuitenkin, että ”*Eurooppalaisessa asfalttiteollisuudessa on yleistä, että käytetään lisäaineita kuten epäorgaanisia tai orgaanisia kuituja, pigmenttejä, vahoja jne., joille ei ole eurooppalaista standardia tai ETA:a. Tämä eurooppalainen standardi sallii näiden materiaalien käytön.*” Standardi siis sallii lisäaineiden käytön, mutta jättää vielä hie-man epäselväksi, tuleeko materiaalien soveltuvuus kuitenkin osoittaa tutkimuksen ja koke-muksien perusteella. Käytettyjen lisäaineiden laatu ja ominaisuudet on standardin mukaan ilmoitettava. Sideaineen osalta standardissa vaaditaan, että asfalttimassan sideaineen tulee olla standardin EN 12591 mukaista tiebitumia, EN 14023 mukaista modifioitua bitumia tai prEN 13924 mukaista kovaa bitumia. Standardissa mainitaan, että tiebitumi valitaan luokista 20/30 – 330/430 ja kova bitumi luokista 10/20 – 15/25. Myös standardin EN 13108-4:2005 liitteen B mukaisen luonnon asfaltin käyttö on sallittu.

Asfalttimassan osalta standardissa on asetettu vaatimuksia muun muassa rakeisuudelle, tyh-jättilalle, peittoasteelle ja tasalaatuisuudelle sekä veden-, nastarengaskulumis- ja deformaa-tiokestävyydelle. Matalalämpöasfaltteihin olennaisesti liittyvä vaatimus on massan lämpö-tila. Käytettäessä tiebitumia standardissa vaaditaan, että massan maksimilämpötilan tulee olla joka paikassa asfalttiasemalla alle taulukon 2 mukaisten ylärajojen. Massalle ei ole ase-tettu minimilämpötilaa, mutta valmistajan tulee ilmoittaa se massaa toimittaessa. Lisäksi taulukon 2 mukaisista lämpötilarajoista voidaan poiketa, jos asfalttimassassa käytetään mo-difioitua bitumia, kovaa bitumia tai lisäaineita, mikä tulee myös dokumentoida ja ilmoittaa CE-merkintään liittyvissä tiedoissa. (SFS-EN 13108-1 + AC).

Taulukko 2. Massan maksimilämpötilan ylärajat (muokattu lähteestä SFS-EN 13108-1 + AC).

Bitumiluokka	Lämpötila °C
20/30	160 – 200
30/45	155 – 195
35/50, 40/60	150 – 190
50/70, 70/100	140 – 180
100/150, 160/220	130 – 170
250/330, 330/430	120 – 160

Asfalttibetonien tuotestandardi ei siis rajoita massan valmistamista matalammassa lämpöti-lassa tai erilaisten lisäaineiden käyttöä, mutta käytettävän bitumin tulee aina olla kyseessä olevalle bitumille sovellettavan standardin mukaista. Eli esimerkiksi käytettäessä valmiiksi

modifioitua bitumia, tulee sen olla standardin EN 14023 mukaista, jotta CE-merkintä voidaan kiinnittää tuotteeseen. Matalalämpöasfaltin valmistusmenetelmien monimuotoisuuden syystä CE-merkinnän kiinnittäminen täytyy arvioida tapauskohtaisesti. Lisäksi on otettava huomioon, että tiiviille asfalttibetonille (ABT) ei ole eurooppalaista tuotestandardia eli sen ei lueta kuuluvan asfalttibetonien tuotestandardiin (PANK ry 2011).

3 Valmistusmenetelmien vaikutuksia asfaltin ominaisuuksiin ja toimintaan

3.1 Vaikutusten arviointi

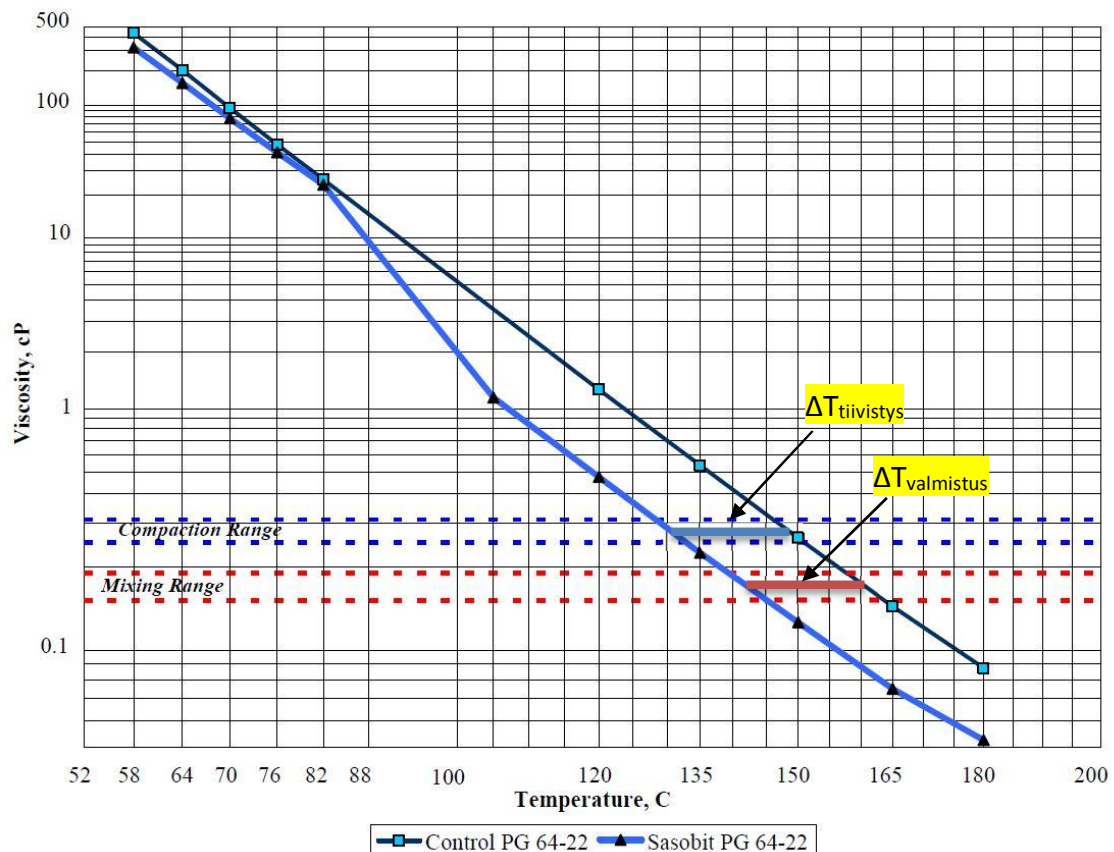
Matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmillä on yhtäläisyyksistä huolimatta erilaisia vaikutuksia asfalttimassaan, vaikka toisaalta jotkin vaikutukset voivat olla yhteisiä jopa kaikille valmistusmenetelmille kuten sideaineen vähäisempi vanheneminen. Useat MLA:n tutkimukset perehtyvät yhteen tai kahteen valmistusprosessiin ja niiden vaikutuksiin asfalttimassaan tai pelkästään sideaineeseen. Tutkimuksissa käytetään usein laboratoriossa valmistettuja koekappaleita, mikä ei aina vastaa todellista valmistusprosessia, etenkin vaahdotusmenetelmien yhteydessä. Laboratoriossa valmistettujen näytteiden tutkimisessa ja vertailussa tulee ottaa huomioon myös näytteiden tiivistystapa. Marshall-vasaran ja kiertotiivistimen avulla tiivistettyjen koekappaleiden kappaletiheyksien ja jäykkyyssmoduulien on havaittu vaihtelevan huomattavasti ja lisäksi Marshall-vasaran on todettu olevan herkkä tiivistyslämpötilalle kun taas kiertotiivistimen on sanottu olevan vähemmän herkkä lämpötilan muutoksille (Zaumanis 2010). Lisäksi valmistusmenetelmien, erilaisten sideaineiden ja asfalttilajien variaatioiden määrä on lukematon eli kaiken kattavien johtopäätelmien tekeminen on mahdotonta. Useimmissa tutkimuksissa kuitenkin todetaan, että MLA:n ominaisuudet vastaavat KA:a, mutta lähes poikkeuksetta suositellaan lisäkokeita vähintään joillakin osa-alueilla. Valmistusmenetelmien vaihtelevan suosion vuoksi myös tutkimusten määrä ja laajuus vaihtelevat huomattavasti eri menetelmien välillä.

3.2 Sideaineen reologia ja vanheneminen

Sideaineiden yhteydessä käytetään usein tunkeuma- tai viskositeettiluokituksen sijaan niin kutsuttua Performance Grade (PG) -luokitusta, jonka tarkoituksena on kuvata sideaineelle sopivia käyttöolosuhteita. Luokituksessa käytetään kahta lukuarvoa, joista ensimmäinen tarkoittaa päällysteen keskimääräistä maksimilämpötilaa seitsemän päivän ajanjaksolla. Toinen lukuarvo puolestaan tarkoittaa minimilämpötilaa, johon suunnitellun päällysteen lämpötilan uskotaan laskevan. Esimerkiksi PG 58-22 on täten tarkoitettu käytettäväksi kun päällysteen seitsemän päivän keskiarvollinen maksimilämpötila on 58 °C ja puolestaan sen minimilämpötilaksi on odotettavissa -22 °C. (Pavement Interactive 2008).

Asfalttimassan valmistaminen perinteistä asfalttimassaa matalammassa lämpötilassa vähentää massan sideaineen vanhenemista. Newcombin (2006) mukaan valtaosa sideaineen vanhenemisesta tapahtuu asfalttiasemalla massan valmistuksen yhteydessä ja valmistuslämpötilan alentaminen vähentää sideaineen hapettumisen vuoksi tapahtuvaa kovenemista. Vähäisempi koveneminen voi parantaa päällysteen joustavuutta ja vähentää mahdollista halkeilua, mikä voi viitata PG-luokituksen minimilämpötilan muuttumiseen. Vähäisempi sideaineen vanheneminen voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia päällysteen kestävyyskorkeissa lämpötiloissa eli päällyste saattaa urautua helpommin. Newcomb jatkaa, että ongelma voidaan kuitenkin ratkaista käyttämällä muodoltaan parempaa, kulmikasta kiviainesta, joka kasvattaa massan sisäistä kitkaa ja siten sen leikkauslujuutta. Toisena ratkaisuna on puolestaan sideaineen vaihtaminen korkeamman maksimilämpötilan PG-luokiteltuun sideaineeseen, mikä tarkoittaa, että vähentynyttä sideaineen vanhenemista kompensoidaan käyttämällä jo valmiiksi kovempaa sideainetta. Bonaquist (2011) esittää kuitenkin, että tutkimusten perusteella vain erittäin suurilla valmistuslämpötilan alennuksilla on merkittäviä vaikutuksia sideaineen jäykkyyteen.

Sasobit®-vahan avulla valmistettuun matalalämpöasfalttiin keskittyvässä tutkimuksessa todettiin, että PG-luokitusta voidaan nostaa lisäämällä vahaa sideaineeseen. Tutkimuksen vertailuasfalttimassassa käytettiin PG 64-22 -luokan sideainetta ja puolestaan MLA:n Sasobit®-vahalla modifioitu sideaine oli PG 58-28 -luokkaa. Sideaineeseen lisättiin 2,5 % Sasobit®-vahaa, mikä nosti sideaineen luokan PG 58-28:sta PG 64-22:een eli vastaavaksi kuin vertailuasfalttimassalla. Kuvassa 4 on esitetty tutkimuksessa käytettyjen sideaineiden viskositeetit lämpötilan funktiona. (Hurley & Prowell 2005). Kuvasta 4 nähdään myös, että tässä tapauksessa vahan avulla voidaan laskea asfalttimassan teoreettista valmistus- ja tiivistyslämpötilaa noin 17 °C korkeiden käyttölämpötilojen viskositeetin pysyessä lähes vastaavana kuin vertailusideaineella.



Kuva 4. Sasobit®-vahan vaikutus sideaineen viskositeettiin eri lämpötiloissa (muokattu lähteestä Hurley & Prowell 2005).

Tutkimuksessa selvitettiin myös Sasoflex®-tuotteen (Sasobit®+SBS) vaikutuksia sideaineeseen ja asfalttimassaan. Sasoflex®-tuotteen etuna on pidetty sen kykyä säilyttää asfalttimassan joustavuus kylmissä olosuhteissa. Tutkimuksessa lisättiin 4 % Sasoflex®-tuotetta PG 58-28- ja PG 64-22-sideaineisiin, jolloin niiden lopullisiksi luokituksiksi saatiin PG 70-22 ja PG 76-22, joista jälkimmäinen on esimerkki Sasoflex®-tuotteen kyvystä säilyttää sideaineen ominaisuuksia kylmissä olosuhteissa. (Hurley & Prowell 2005).

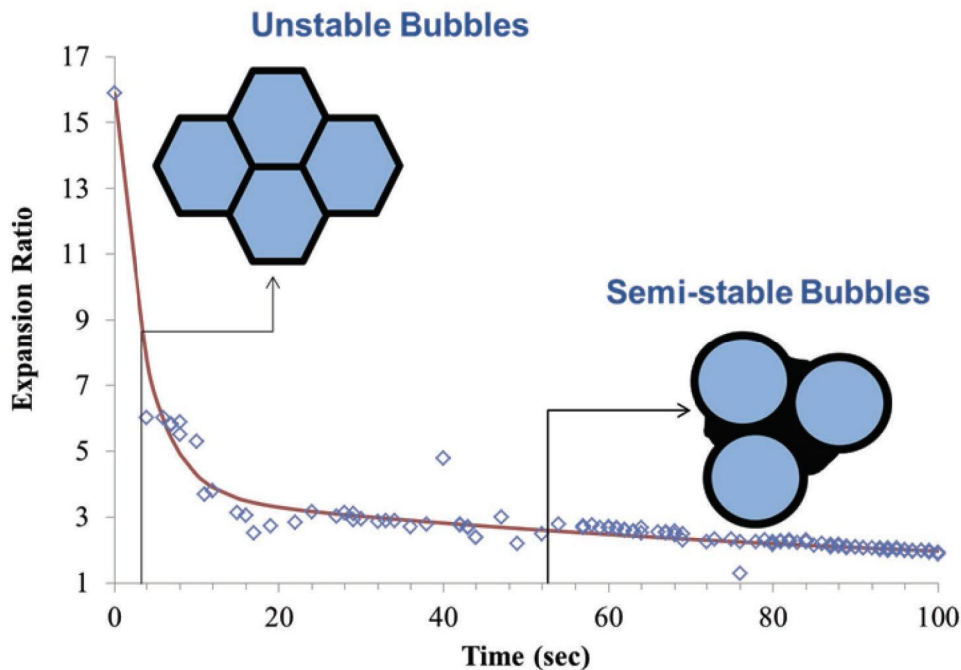
Tulosten tulkinnassa on kuitenkin hyvä pitää mielessä, että tutkimuksessa vertailtiin esimerkiksi asfalttimassoja, joissa oli käytetty sideaineita PG 64-22 ja Sasobit PG 64-22, joka tarkoittaa siis sideainetta PG 58-28, johon lisättiin 2,5 % Sasobit®-vahaa. Lähestymistapa on hieman harhaanjohtava, mutta toisaalta sen käyttö viittaa osittain todistettuun hypoteesiin, jonka mukaan vertailluilla sideaineilla valmistetut päällysteet vastaavat toisiaan.

Toisessa tutkimuksessa havaittiin, että 3 % pitoisuudella Sasobit®-vahan avulla voidaan alentaa viskositeettiin perustuvaa valmistuslämpötilaa vain noin 6 °C, mikä oli odotuksien vastaista. Tutkimuksessa todettiin, ettei viskositeettiin perustuva valmistuslämpötilan valinta ole aina mahdollinen, vaan ongelmaa pitäisi lähestyä eri menetelmillä. Tutkimuksessa käytettiin samaa 40/60-tunkeumaluokan sideainetta kaikissa koetuksissa eli ainoana erona oli siis käytetty lisäaine ja sen määrä. Tulosten perusteella havaittiin, että Sasobit® kasvattaa sideaineen viskositeettia vahan kiteytyessä, mikä parantaa päällysteen deformaatiokestävyyttä etenkin korkeissa käyttölämpötiloissa. (Zaumanis 2010).

Tutkimustulosten eroavaisuuksia selittävät niiden erilaiset lähestymistavat, sillä toisessa käytettiin Sasobit®-vahaa ja pehmeämpää sideainetta kuin vertailusideaine ja toisessa käytettiin melko jäykkää 40/60-sideainetta kaikissa koetuksissa. Orgaanisten lisäaineiden on sanottu alentavan sideaineen viskositeettia valmistuslämpötiloissa, mutta tutkimukset viittaavat siihen, että orgaanisia lisäaineita käytettäessä voidaan käyttää pehmeämpää sideainetta, jolloin käyttölämpötilojen ominaisuudet säilyvät, mutta valmistuslämpötilaa voidaan laskea. Bonaquistin (2011) mukaan useiden MLA:n valmistusmenetelmien vaikutus perustuu ennemmin niiden kykyyn parantaa sideaineen voitelukykyä kuin alentaa sen viskositeettia.

Esimerkiksi kemiallisella Cecabase RT® -lisäaineella ei havaittu vastaavaa vaikutusta sideaineeseen. Lisäainetta tutkittiin yhdessä alueella yleisesti käytetyn polymeerimodifioidun PG 64-28PM/NV -sideaineen kanssa. Lyhenteet sideaineen PG-luokituksen perässä tarkoittavat, että sideaine täyttää sille asetettuja lisävaatimuksia esimerkiksi RTFOT-vanhennettujen näytteiden reologisten ominaisuuksien osalta. Tutkimuksessa lisäainetta käytettiin 0,4 p-% sideaineesta eikä sillä havaittu olevan merkittäviä vaikutuksia sideaineen ominaisuuksiin, mutta sen havaittiin hieman pehmentävän sideainetta. Lisäaineella ei ollut vaikutusta sideaineen PG-luokitukseen ja myös lisäaineella modifioitu sideaine täytti kaikki sille asetetut lisävaatimukset. (Hajj & Cortez 2011).

Vaahdotusmenetelmissä sideaine laajenee hyvin voimakkaasti, mutta vaahdon koostumus alkaa välittömästi hajota. Vaahdon tilavuuden on sanottu puolittuvan muutamien ensimmäisten sekuntien aikana vaahdotuksen alussa eli maksimitilavuuden saavuttamisesta. Kuvassa 5 on esitetty sideaineen laajentumiskerroin ajan funktiona. Myös vaahdon koostumus muuttuu ajan kuluessa, sillä suuret kuplat nousevat nopeammin pintaan kuin pienet kuplat ja täten hajaavat nopeammin. (Newcomb ym. 2015).

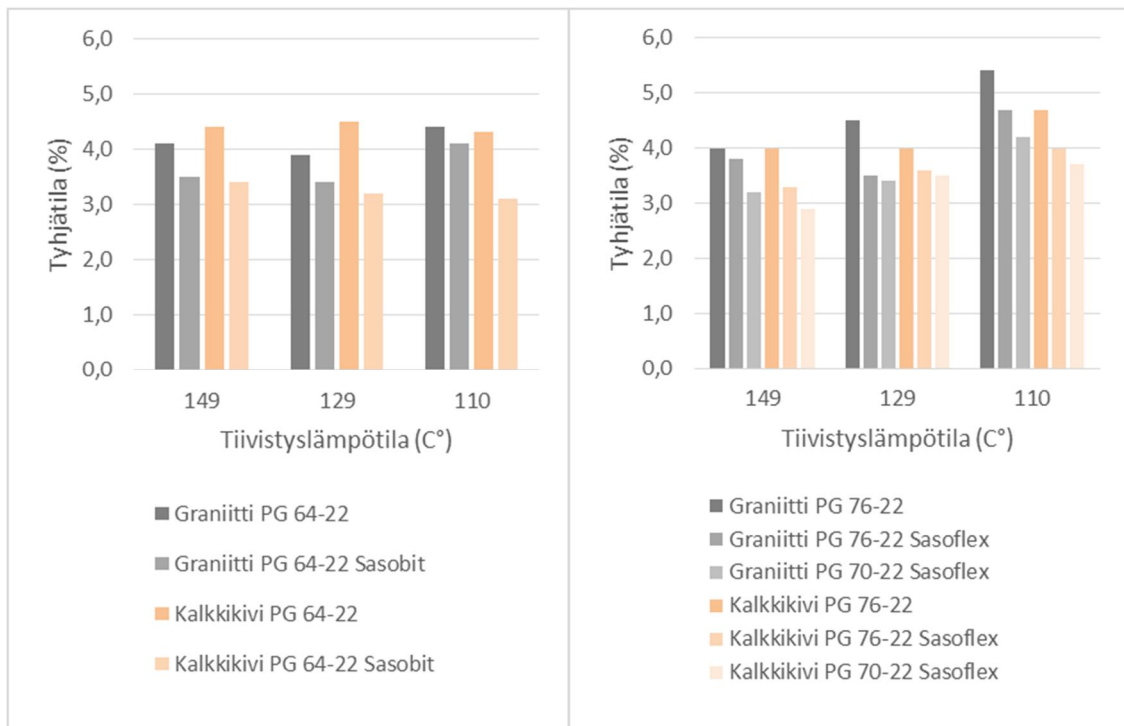


Kuva 5. Sideaineen laajentumiskerroin ajan funktiona (Newcomb ym. 2015).

Laboratoriovanhentamisen yhteydessä vaahdotettujen sideaineiden painohäviön havaittiin olevan huomattavasti suurempi kuin vertailusideaineen, mikä viittaa kosteuteen sideaineessa eli vaahdotuksen vaikutus ei kuitenkaan lakkaa välittömästi sekoituksen yhteydessä. Vanhennettujen vaahdotettujen sideainenäytteiden korkean lämpötilan luokituksessa havaittiin pientä kasvua ja reometrimittauksissa vähäisiä muutoksia, joiden sanottiin mahdollisesti häviävän todellisessa asfalttimassan valmistuksessa. Vaahdotuksella ei havaittu olevan vaikutusta sideaineen jäykkyyteen matalissa lämpötiloissa tai sideaineen kemialliseen koostumukseen. (Newcomb ym. 2015).

3.3 Asfalttimassan tiivistyminen, jäykkyys ja urautuminen

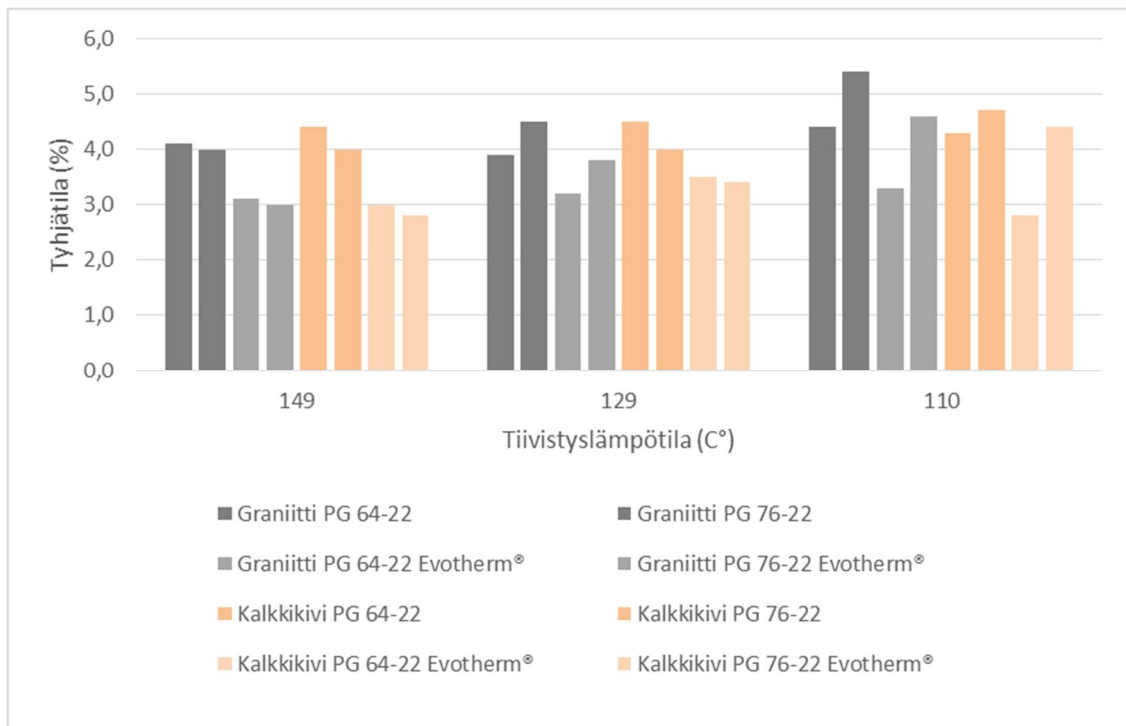
Kuvassa 6 on esitetty Sasobit®- ja Sasoflex®-tuotteisiin perehtyvän tutkimuksen tyhjätilatuloksia laboratoriossa valmistetuille ja tiivistetyille koekappaleille kolmessa eri tiivistyslämpötilassa kahdella kiviaineksella. Koekappaleiden asfalttimassan maksimiraekoko oli 12,5 mm ja se oli tyypiltään karkearakeista AB-massaa eli kiviaineksen hienoaines- ja hiekkapitoisuus oli pieni. Tutkimuksessa asfalttimassojen sekoituslämpötilat olivat noin 14 °C tiivistyslämpötiloja korkeammat ja näytteitä tiivistettiin tärytiivistimellä 30 sekunnin ajan. Kuvasta 6 nähdään, että tuotteita käytettäessä saavutettiin pienempi tyhjätila kuin vastaavilla vertailumassoilla kaikissa kolmessa tiivistyslämpötilassa ja molemmilla kiviaineksilla. Lisäksi kaikissa tiivistyslämpötiloissa vahaa sisältävien näytteiden tyhjätila oli vastaava tai pienempi kuin vertailunäytteiden tyhjätila 149 C°:n tiivistyslämpötilassa yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. (Hurley & Prowell 2005).



Kuva 6. Sasobit®-vahan vaikutus tyhjättilaan laboratoriokeissa (muokattu lähteestä Hurley & Prowell 2005).

Tutkimuksessa havaittiin, että Sasobit® ei vaikuta päällysteen jäykkyysmoduuliin verrattuna saman PG-luokituksen sideaineella valmistettuihin päällysteisiin, mutta se kasvatti päällysteen urautumiskestävyyttä huomattavasti. Lisäksi havaittiin, että Sasobit®-vahaa sisältävien näytteiden halkaisuvetolujuudet (HVL) olivat joissakin tapauksissa vertailumassan HVL-tuloksia pienempiä, minkä on uskottu viittaavan jälleen vähäisempään sideaineen vanhenemiseen. (Hurley & Prowell 2005).

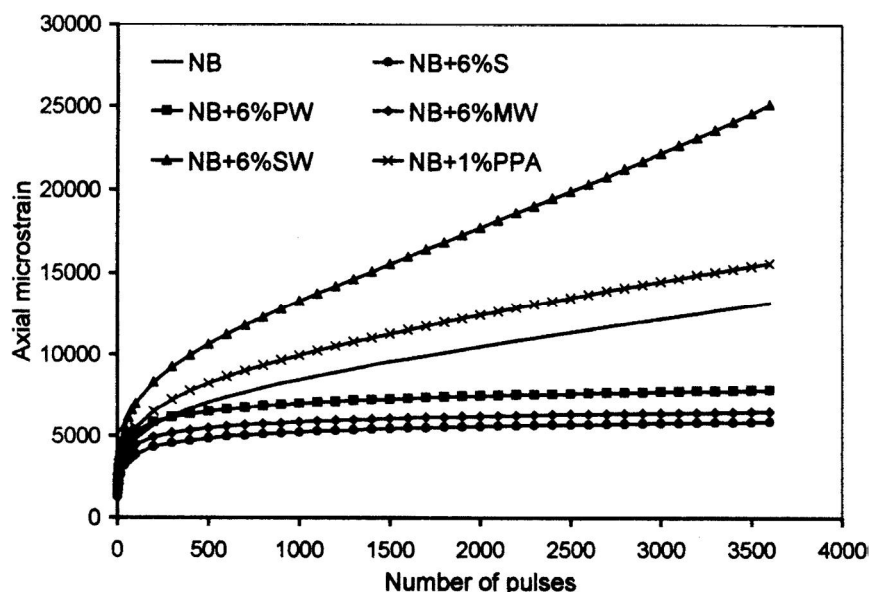
Kuvassa 7 on esitetty vastaavan tutkimuksen tyhjättilatuloksia käytettäessä Evotherm®-lisäainetta. Kuvasta nähdään jälleen, että lisäaineilla on selvästi tyhjättilaa pienentävä vaikutus laboratoriokeille ja vaikutus säilyy myös tiivistyslämpötilaa laskettaessa. Hurley & Prowell (2006b) mukaan Evotherm®-lisäainetta hyödyntävä MLA tiivistyi paremmin kuin vertailumassa käytettäessä kierto- tai tärytiivistintä ja keskimääräinen tyhjättilojen ero MLA:n ja vertailtavan KA:n välillä oli jopa 1,4 %. Heidän mukaansa lisäaineen avulla voidaan parantaa myös asfalttimassan jäännösmoduulia sekä vähentää urautumisherkkyttä verrattuna perinteiseen asfalttimassaan. Niin MLA:n kuin vertailtavan KA:n urautumisherkkyys kuitenkin kasvoi valmistus- ja tiivistyslämpötilaa laskettaessa, mutta MLA:lla vaikutus oli vähäisempi, minkä todettiin korreloivan vahvasti paremman tiivistymisen kanssa joissakin tapauksissa. Vaikka MLA:lla saatiin hyviä tuloksia urautumisen ja jäykkyyden osalta, olivat sen HVL-tulokset joissakin tapauksissa huonompia kuin vertailumassan. Lisäksi tutkimuksessa todettiin, että valmistettaessa MLA-massaa alle 129 °C:n lämpötilassa sideaineen PG-luokitusta tulisi kasvattaa korkeiden lämpötilojen osalta, jotta vähäisempi sideaineen vanheneminen ei vaikuttaisi päällysteen urautumiseen.



Kuva 7. Evotherm®-lisäaineen vaikutus tyhjätilaan laboratoriokeissa (muokattu lähteestä Hurley & Prowell 2006b).

Edwards ym. (2006) tutkivat erilaisten kaupallisten orgaanisten lisäaineiden vaikutuksia päällysteen kestävyys. Tutkimuksessa käytettiin tunkeumaluokan 160/220-sideainetta ja käytetyt lisäaineet olivat FT-vaha, montaanivaha, polyeteenivaha, puristettu parafiinivaha ja polyfosforihappo. Tässä yhteydessä merkittävien Sasobit®-FT-vahan ja Asphaltan® B -montaanivahan havaittiin kasvattavan päällysteen deformaatiokestävyyttä jaksollisen virumiskokeen (dynamic creep test) perusteella. Tutkimuksen virumiskokeiden tuloksia on esitetty kuvassa 8, josta nähdään myös, että muilla vahoilla oli haitallisia vaikutuksia deformaatiokestävyyteen. Lisäksi sideaineiden reometrimittauksien ja koekappaleiden kuormituskokeiden perustella havaittiin, että lisäämällä 6 % vahaa voidaan kasvattaa kompleksimoduulia (G^*) ja laskea vaihekulmaa (δ). Myös Zaumanis (2010) havaitsi tämän tutkimuksessaan, mutta jo pienemmillä Sasobit®-pitoisuuksilla.

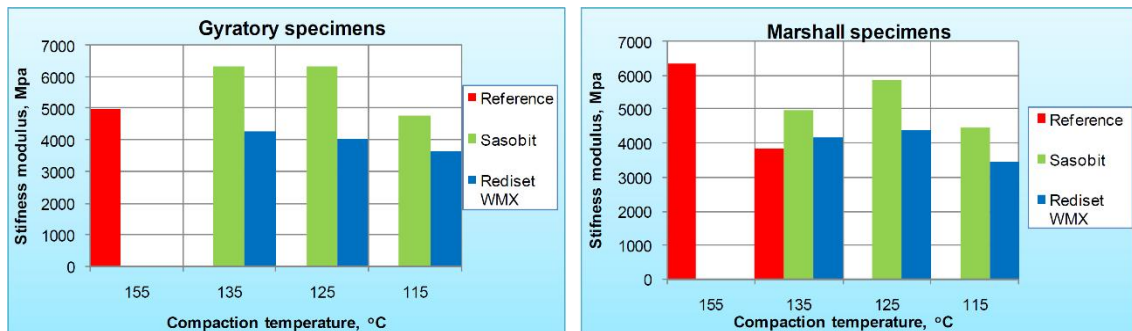
Kompleksimoduulin avulla voidaan kuvastaa asfaltin jäykkyyttä eli toisin sanoen kestävyttä toistuvasta kuormituksesta aiheutuvaa deformaatiota vastaan. Vaihekulma kuvastaa puolestaan asfaltin virtavuutta eli viivettä kuormituksen ja muodonmuutoksen välillä. Vaihekulman avulla voidaan arvioida sideaineen viskoelastisuutta, sillä suuri vaihekulma tarkoittaa, että materiaali on viskoosista ja pieni vaihekulma tarkoittaa puolestaan, että materiaali on elastista. Päällysteen elastisuus on hyödyllistä deformaatiota vastaan, mutta liian jäykkään päällysteeseen voi aiheutua väsymishalkeamia. (Pavement Interactive 2011).



Kuva 8. Jaksollisen virumiskokeen tuloksia (testauslämpötila 40 °C, S=Sasobit®, MW=Asphaltan® B) (Edwards ym. 2006).

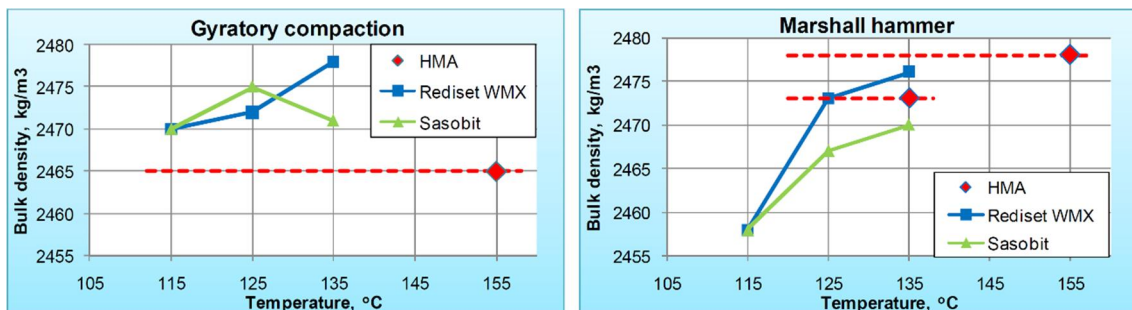
Hurley & Prowell (2006a) havaitsivat myös tutkimuksessaan, etteivät zeoliitit, Sasobit®- tai Evotherm®-lisäaineet kasvata päällysteen urautumisherkkyyttä. Urautumisherkkyys korreloi myös heidän mukaansa valmistuslämpötilan kanssa mahdollisesti vähentyneen sideaineen vanhenemisen takia. Kuitenkin Sasobit®-vahaa sisältävien päällysteiden urautumisherkkyys ei kasvanut samassa suhteessa vertailupäällysteen kanssa valmistuslämpötilaa laskettaessa. Tämä voi viitata FT-vahan kykyyn jäykistää asfalttimassaa korkeissa käyttölämpötiloissa.

Perinteistä KA:a sekä Sasobit®- ja Rediset WMX -lisäaineiden avulla valmistettua MLA:a vertailevassa tutkimuksessa havaittiin selvä ero Sasobit®-vahan ja kemiallisen Rediset WMX -lisäaineen jäykkyskoetuloksissa. Kiertotiivistintä käytettäessä Sasobit®-vahalla saatiin lähes yhtä suuri jäykkysmoduulin arvo 115 °C tiivistyslämpötilassa kuin vastaavalle KA:lle, joka tiivistettiin 40 °C:a korkeammassa lämpötilassa. Rediset WMX -tuotetta käytettäessä jäykkysmoduulin arvot puolestaan laskivat tiivistyslämpötilan mukaan. Marshall-vasaraa käytettäessä KA:lle saatiin 155 °C:n tiivistyslämpötilassa selvästi suurin arvo, mutta 135 °C tiivistyslämpötilassa molempia lisäaineita käytettäessä saatiin KA:n jäykkysmoduulia suurempi arvo. Tutkimuksessa todettiin, että 125 - 135 °C:n tiivistyslämpötilassa lisäaineita käytettäessä saadaan lähes vastaavia jäykkysmoduulin arvoja. Tiivistyslämpötilan laskemisen 115 °C:en tulkittiin kuitenkin laskevan asfalttimassan jäykkyyttä. Tutkimuksen jäykkysmoduulituloksia voidaan tarkastella kuvasta 9. (Zaumanis 2010).



Kuva 9. Laboratoriossa valmistettujen näytteiden jäykkyyскоetuloksia (testauslämpötila 20 °C) (muokattu lähteestä Zaumanis 2010).

Zaumanis (2010) toteaa tutkimuksessaan, että Sasobit®- ja Rediset WMX -lisäaineiden avulla MLA tiivistyy 125 °C:n, ellei jopa 115 °C:n, lämpötilassa yhtä hyvin kuin vastaava KA, joka tiivistettiin 155 °C:n lämpötilassa. KA:n 155 °C:n tiivistyslämpötila oli melko korkea, mutta silti vertailtavien MLA-näytteiden kappaleitiheydet olivat joskus jopa suurempia kuin KA:lla. Tutkimuksen tuloksia on esitetty kuvassa 10. Laboratoriotutkimuksessa oli erikoista Marshall-vasaralla ja kiertotiivistimellä tiivistettyjen näytteiden kappaleitiheyksien erot. Marshall-vasaralla KA:n kappaleitiheys oli suurempi kuin MLA:n, mutta kiertotiivistimellä tilanne oli päinvastainen. Zaumanis kuitenkin perustelee, että kiertotiivistin simuloi paremmin todellista tiivistystyötä, jossa kivirakeet voivat järjestyä uudelleen, kuin Marshall-vasara, jonka tiivistysvoima perustuu iskuihin. Lisäksi hän painottaa, että tulosten pieni hajonta selittää esimerkiksi kiertotiivistimellä Sasobit®-vahalla 135 °C:n tiivistyslämpötilassa saavutettua poikkeavaa kappaleitiheyttä, joka voidaan olettaa menetelmän epätarkkuuden syyksi.



Kuva 10. Sasobit® ja Rediset WMX -lisäaineiden vaikutuksia kappaleitiheyteen eri tiivistyslämpötiloissa ja -menetelmillä (muokattu lähteestä Zaumanis 2010).

Useiden erilaisten testien perusteella on havaittu, että KA:n ja MLA:n välillä on työstettävyyseroja. Työstettävyyserot ovat kuitenkin havaittavissa vasta kun asfalttimassojen lämpötila laskee MLA:n tiivistyslämpötiloihin, jolloin eroja on havaittu myös kiertotiivistimellä tiivistettyjen kappaleiden tyhjätiloissa (Bonaquist 2011).

WAM® foam -menetelmällä valmistettua MLA:a ja sitä vastaavaa KA:a tutkittiin Norjassa kahdella eri tiellä, joilla tehtiin useita uramittauksia vuosien 2000 ja 2003 välillä. Tiellä RV120 MLA:n ja KA:n tyhjätilatutkimuksissa molemmiin päällysteille saatiin sama 3,9 %:n keskiarvo, mutta MLA:n havaittiin urautuneen hieman vähemmän. Puolestaan tiellä FV82 havaittiin, että MLA:n tyhjätila oli hieman KA:n tyhjätilaa suurempi. Tiellä tehdyissä ura- ja IRI-mittauksissa saatiin lähes samoja arvoja, mutta MLA oli urautunut KA:a enemmän. (Kristjansdottir 2006).

Norjalaisen FAV-yhdistyksen (2011) LTA2011-tutkimuksessa selvitettiin laboratorio- ja kenttäkokeiden avulla erilaisten matalalämpöasfalttien ominaisuuksia verrattuna vastaaviin kuuma-asfaltteihin. Taulukossa 3 on esitetty tutkimuksen koekohteiden lyhenteet sekä niissä käytetyt asfalttilajit, sideaineluokat, MLA-menetelmät, valmistus- ja tiivistyslämpötilat sekä mitattujen alku-urien keskiarvot.

Taulukko 3. LTA2011-tutkimuksen koekohteet (muokattu lähteestä FAV 2011).

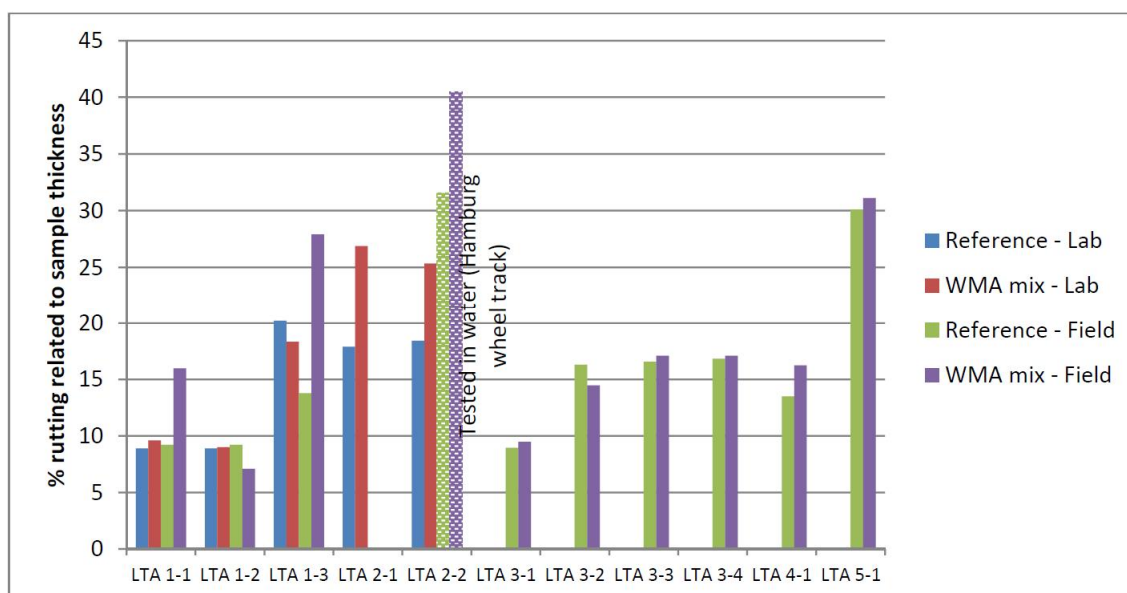
Koe- kohde	Asfalttimassa	MLA-mene- telmä	T _{valmistus}		T _{tiivistys}		Alku-ura, ka.	
			Ref. (°C)	MLA (°C)	Ref. (°C)	MLA (°C)	Ref. (mm)	MLA (mm)
LTA 1-1	AB 11 70/100	Rediset WMX	137-164	121-149			3,1	3,1
LTA 1-2	AB 11 70/100	WAM foam	152-171	112-137			3,0	3,6
LTA 1-3	AGB 11 160/220	WAM foam	130-170	100-130	148	112	3,3	3,2
LTA 2-1	AGB 11 RC8 160/220	Green Asphalt	155-162	128-133	n. 150	n. 120	2,2	2,4
LTA 2-2	AB 16 RC10 70/100	Green Asphalt *			150-170	110-140	3,2	2,3
LTA 3-1	AB 11 70/100	Cecabase RT	160-162	128-129	155	129-132	3,8	5,1
LTA 3-2	AB 11 160/220	Cecabase RT	160-164	132-134	153-164	126-135	4,2	4,2
LTA 3-3	AGB 11 160/220	LMK foam	160-163	132-138	148-162	121-135	3,5	3,1
LTA 3-4	AGB 11 160/220	LMK foam	163-173	130-135	144-158	122-135	2,5	2,8
LTA 4-1	AB 16 70/100	Cecabase RT	158-168	133-140	158	133	3,5	4,4
LTA 5-1	AB 11 RC? 70/100	Sasobit **					4,2	4,1

*MLA RC30 vs KA RC10

**MLA bit. 160/220, MLA ja KA esilämmitetty asfalttirouhe

AGB = Asfaltgrusbetong, pehmeämpi sideaine kuin AB, vähäliikenteisille teille.

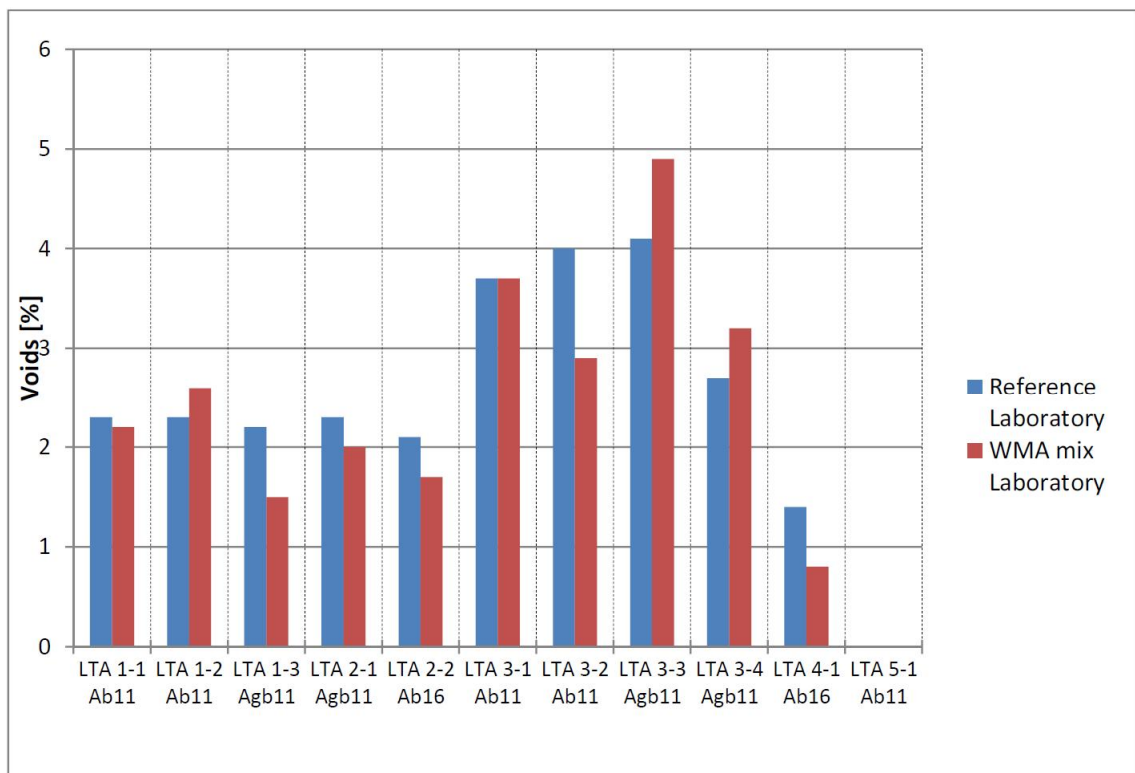
Taulukosta 3 nähdään, että vertailtavien asfalttimassojen alku-urat ovat hyvin vastaavia lukuun ottamatta yhtä poikkeamaa eli LTA 3-1 kohdetta jossa keskiarvojen ero oli 1,3 mm. Uramittausten välisiä eroja selittää myös, että LTA 3-3 ja LTA 3-4 kohteiden KA-massat sekä MLA-massat ovat täysin vastaavia, mutta silti KA-massojen alku-urien keskiarvoilla on 1,0 mm ero ja MLA-massoilla ero on pienempi. Tutkimuksessa selvitettiin myös laboratoriossa valmistettujen sekä tieltä porattujen näytteiden urautumista laboratoriokokeilla. Urautumiskokeiden tuloksia on esitetty kuvassa 11. (FAV 2011).



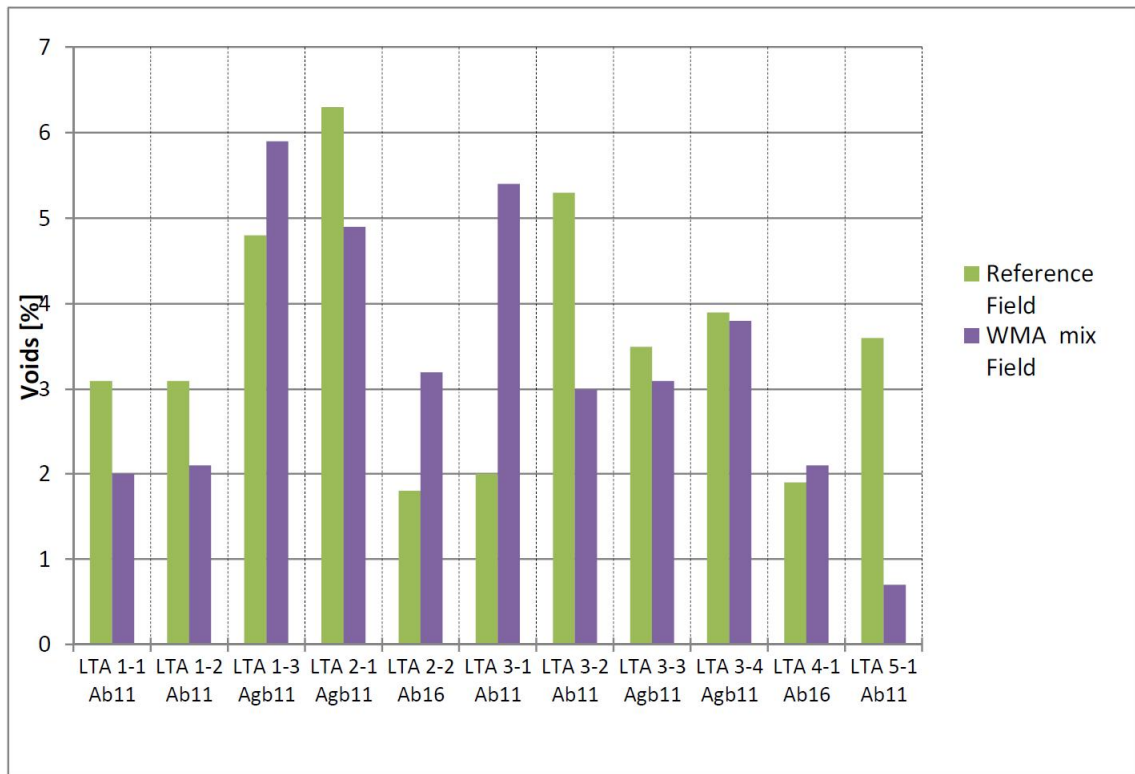
Kuva 11. LTA2011-tutkimuksen laboratoriossa tehtyjen urautumiskokeiden tuloksia (FAV 2011).

Merkittävin havainto laboratoriossa tehdyissä urautumiskoetuloksissa oli, että Green Asphalt (LTA 2-1 ja LTA 2-2) urautui vertailumassaa enemmän vaikka Green Asphalt -päällysteen alku-urautuminen oli vastaavaa tai vähäisempää kuin vertailumassalla. Tutkimuksessa huomautetaan kuitenkin, että LTA 2-2 -vertailumassa sisälsi vain 10 % asfalttirouhetta kun taas MLA-massassa oli käytetty 30 % asfalttirouhetta. Lisäksi LTA 2-1 -kohteelta porattujen näytteiden koestus jouduttiin keskeyttämään liian nopean urautumisen takia niin KA-massalla kuin MLA-massa. (FAV 2011). LMK foam (LTA 3-3 ja LTA 3-4) -päällysteiden kohteilta porattujen näytteiden urautuminen vastasi hyvin vertailumassan urautumista.

Tutkimuksessa tehtiin myös tyhjätilakokeita laboratoriossa valmistetuille ja tieltä poratuille näytteille. Kokeiden perusteella havaittiin, että KA-massojen tyhjätilat olivat usein suurempia kuin MLA-massojen tyhjätilat. Marshall-vasaralla tiivistetyille laboratoriossa valmistetuille AB 11 -näytteille oli vaatimuksena 2 – 5,5 % tyhjätila ja AGB 11 -näytteille 2 – 6 % tyhjätila sekä tieltä poratuille näytteille puolestaan 2 – 5 % tyhjätila molemmille asfalttilajeille. Kuvissa 12 ja 13 on esitetty tutkimuksen tyhjätilatuloksia laboratoriossa valmistetuille ja tieltä poratuille näytteille.



Kuva 12. Laboratoriossa valmistettujen näytteiden tyhjätilatuloksia LTA2011-tutkimuksessa (FAV 2011).



Kuva 13. Tieltä porattujen näytteiden tyhjätilatuloksia LTA2011-tutkimuksessa (FAV 2011).

Laboratoriossa tiivistetyillä Green Asphalt -massoilla saatiin hieman pienempiä tyhjätiloja kuin vertailumassoilla, mutta tyhjätilat olivat melko lähellä vaatimusten alarajaa. Molemmilla LMK foam -massoilla laboratorionäytteiden tyhjätila oli suurempi kuin vertailumassoilla, mutta kuitenkin ohjerajojen sisällä. Tieltä poratuilla näytteillä Green Asphalt -massalla oli toisella kohteella pienempiä tyhjätiloja kuin vertailumassalla ja toisella kohteella suurempia tyhjätiloja. LMK foam -massalla saatiin puolestaan molemmilla kohteilla hieman vertailumassaa pienempiä tyhjätiloja, jotka sopivat ohjerajojen sisään erinomaisesti.

Matalalämpöasfaltin on sanottu olevan paremmin levitettävissä ja tiivistettävissä myös kylmissä olosuhteissa kuin perinteinen KA. Esimerkiksi Saksassa tehdyssä tapaus-tutkimuksessa levitettiin kolmikerrospäällyste, jossa jokaisessa kerroksessa käytettiin matalalämpöasfalttia, jonka valmistusmenetelmä perustui vaahdotukseen Aspha-min-zeoliiteillä. Päällystystyön aikana ympäristön lämpötila oli -1..3 °C ja levitetyn massan lämpötila vaihteli 102 – 139 °C välillä. Tutkimuksessa havaittiin, että MLA:lla saavutettiin parempi tiiveys kuin KA-massalla yhtä monilla tai vähemmällä jyräyskerroilla. (D'Angelo ym. 2008). Zeoliitteja käytettäessä on kuitenkin otettava huomioon, että niiden työstettävyyttä parantava vaikutus lakkaa, kun asfalttimassan lämpötila laskee 100 °C:n alle (EAPA 2014). MLA-massojen lämpötilan on sanottu laskevan KA-massoja hitaammin, sillä niiden lämpötilaero ympäristön kanssa on pienempi. Esimerkiksi Kolo Veidekke -asfalttiyritys on raportoinut säilyttäneensä WAM-Foam MLA-massaa siilossa kaksi päivää, minkä jälkeen massa levitettiin ja tiivistettiin onnistuneesti. (D'Angelo ym. 2008). Kristjansdottir (2006) mukaan MLA:n valmistusmenetelmien vaikutukset ovat hyödyllisiä erityisesti kylmissä olosuhteissa, kun massa valmistetaan normaaleissa kuuma-asfaltin lämpötiloissa.

3.4 Mahdollisia vaurioita ja arvioita vauriomekanismeista

Matalalämpöasfalttien mahdolliset ongelmat liittyvät usein päällysteen urautumiseen tai kosteusvaurioihin, mutta myös ongelmien laajuus vaihtelee huomattavasti valitun valmistusmenetelmän perusteella ja niitä voidaan lieventää tarvittaessa tartukkeiden avulla. Etenkin kylmissä olosuhteissa MLA:n valmistuksessa onkin vaikeutena löytää tasapainoa kestävyiden, valmistuslämpötilan laskemisen ja mahdollisten tartukkeiden välille. MLA:n valmistusmenetelmissä on kuitenkin otettu huomioon, että asfalttimassa tiivistyy matalammissa lämpötiloissa hyvin, mikä vähentää päällysteen vedenläpäisevyyttä ja siten myös mahdollisuutta kosteusvaurioihin (Kristjansdottir 2006).

Lisäksi ongelmia voidaan saada aikaisiksi, jos MLA-massan suunnittelu epäonnistuu, sillä esimerkiksi joidenkin valmistusmenetelmien kohdalla kiviaineksen peittyminen voi olla ongelmallista ja lisäaineiden käyttö voi muuttaa massan optimisideainepitoisuutta. Myös sideaineluokan valinnassa pitää ottaa huomioon mahdolliset lisäaineet ja sideaineen vanheneminen, jotka voivat vaikuttaa sideaineen ominaisuuksiin ja täten päällysteen kestävyys. (Epps Martin ym. 2014). MLA:n suunnittelussa voi olla myös tarpeellista ottaa huomioon esimerkiksi käytettävän lisäaineen soveltuvuus käytettävälle kiviainekselle. Hurley & Prowell (2006b) havaitsivat 121 °C:n lämpötilassa valmistetuilla vertailumassalla ja Evotherm® MLA-massalla visuaalisia tartuntaongelmia käytettäessä kalkkikiveä sekä alhaisia HVL-suhdelukuarvoja MLA-massalla. Kuitenkin MLA:n tuloksia saatiin parannettua huomattavasti muuttamalla Evotherm®-lisäaineen koostumusta käytetylle kiviainekselle sopivammaksi lisäaineen valmistajan toimesta. Muokatun lisäaineen avulla näytteiden HVL kasvoi ja visuaaliset tartuntaongelmat saatiin poistettua.

Kosteusvaurioherkkyyden on havaittu muuttuvan useiden erilaisten tekijöiden vaikutuksesta. Näitä tekijöitä ovat muun muassa veden lisääminen vaahdotusmenetelmissä, märkä tai kostea kiviaines, vähäisempi sideaineen absorptio matalammissa lämpötiloissa sekä huonopmpi kiviaineksen peittyminen ja tartunta joidenkin lisäaineiden vaikutuksesta. Matalalämpöasfalttien kosteusvaurioherkkyyttä on tutkittu melko laajasti, mutta vaahdotusmenetelmien osalta on yleensä keskitytty vain zeoliitteihin, vaikka vaahdotuksessa veden lisäämisen on sanottu vaikuttavan kosteusvaurioherkkyyteen. (Epps Martin ym. 2014). Osasyynä saatetaan olla, että useat tutkimukset perustuvat vain laboratorionäytteisiin ja vesi-injektioon perustuvan vaahdotusmenetelmän simulointi laboratorionäytteille voi olla hankalaa.

Yhdysvalloissa asfalttimassojen kosteusvaurioherkkyyttä arvioidaan usein niin kutsutun parannetun lottman -kokeen (Modified lottman test, AASHTO T283) perusteella, minkä tuloksena saadaan HVL-suhdeluku. Kokeessa tehdään HVL-koestuksia 25 °C:n lämpötilassa kuiville sekä märille näytteille nopeudella 51 mm/min. Märkäsittelyssä näytteitä kyllästetään ensin vedessä alipaineessa ja sen jälkeen ne altistetaan yhdelle jäätymis-sulamis-syklille sekä viimeiseksi niihin imeytetään vettä lämpimässä hauteessa. HVL-suhdeluvulla tarkoitetaan märän näytteen HVL:n ja kuivan näytteen HVL:n osamäärää, jonka raja-arvona on 0,8. Joissakin osavaltiossa käytetään myös lisävaatimuksia kuivan ja/tai märän näytteen HVL:lle. Esimerkiksi Texasissa kuivan näytteen HVL:n minimiarvo on 85 psi (≈586 kPa) ja puolestaan Nevadassa 60 psi (≈414 kPa) käytettäessä modifioimatonta sideainetta tai 90 psi (≈621 kPa) modifioidulla sideaineella. (Epps Martin ym. 2014).

Toinen yleinen koe kosteusvaurioherkkyyden sekä urautumisen määrittämiseksi on HWTT (Hamburg Wheel Tracking Test), jonka suosio on kasvanut sen monikäyttöisyyden ansiosta.

Kokeessa näytekappaleisiin kohdistetaan useita kuormituksia niiden yli kulkevan renkaan avulla, jolloin niiden pinta urautuu. Kokeen tulkinta perustuu urasyvyyden kasvuun kuormituskertojen funktiona ja mitattujen arvojen perusteella voidaan laskea niin kutsutut virumiskulmakerroin ja purkautumiskulmakerroin sekä purkautumisen käänne piste. (Epps Martin ym. 2014).

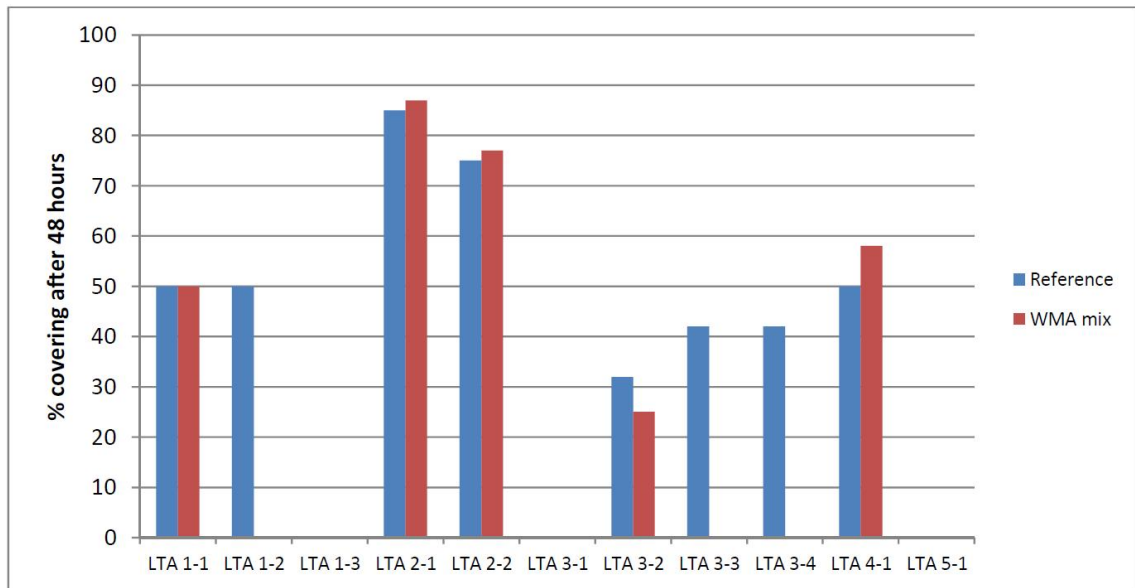
Epps Martin ym. (2014) perehtyivät matalalämpöasfalttien kosteusvaurioherkkyyteen hyvin laajassa tutkimuksessa, jossa mitattiin muun muassa koekappaleiden HVL-suhdelukujen ja HWTT-arvojen lisäksi jäännösmoduuliarvoja (M_R) kuivilla sekä märillä näytteillä, jotka oli käsitelty kuten parannetussa lottman -kokeessa. Koestettavia näytteitä oli kolme kumpaakin lajia ja niiden jäännösmoduulien perusteella laskettiin myös suhdeluku (M_R -ratio). Tutkimuksessa käytettiin Sasobit®- ja Evotherm® DAT- ja 3G -lisäaineita sekä vaahdotusmenetelmiä, joista ainakin yksi oli vesi-injektioon perustuva Eco-Foam II. Asfalttimassoja valmistettiin ympäri Yhdysvaltoja neljässä eri sijainnissa, joista kahdessa käytettiin myös asfalttirouhetta. Koepäällysteistä otettiin poranäytteitä kohteen valmistumisen jälkeen sekä yhden kesän ja/tai yhden talven jälkeen ja lisäksi näytteitä valmistettiin laboratoriossa joko kokonaan tai pelkästään tiivistämällä asfalttiasemalla valmistettua massaa. Tutkimuksen kohteiden yhteenveto sekä tuloksia on esitetty liitteessä 2.

Tutkimuksessa havaittiin muun muassa, että MLA:t voivat olla alttiimpia kosteusvaurioille niiden käyttöiän alussa kuin vastaavat KA:t, mutta MLA-päällysteiden vanheneminen yhden kesän aikana nostaa niiden kestävyys vastavaksi kuin kuuma-asfalteilla. Alkuiän kosteusvaurioherkkyyttä voidaan kuitenkin kompensoida tartukkeilla, mutta niiden yhteensopivuus MLA:n valmistusmenetelmän kanssa tulisi selvittää. Laboratoriokokeiden ja päällysteiden hyvän kunnon välillä havaittiin yhdenmukaisuuksia Montanassa ja New Mexicossa kaikilla asfalttimassoilla, mutta Iowassa havaittiin, että päällysteen kunto oli heikko matalalämpöasfalteilla, joissa oli käytetty asfalttirouhetta. Niin MLA- kuin KA-päällysteiden jäykkyysien havaittiin kasvavan päällysteiden vanhetessa. Iowassa ja Texasissa MLA-päällysteiden alkujäykkyys oli vertailupäällysteitä pienempi, mutta MLA-päällysteiden jäykkyyden kasvu oli nopeampaa ja kuivista näytteistä mitatut M_R -arvot saavuttivat vertailumassojen arvot kesäkausien jälkeen Iowassa 12 kuukauden ikäisinä ja Texasissa 8 kuukauden ikäisinä. HVL- ja M_R -suhdelukujen sekä HWTT-tulosten perusteella todettiin, että KA:lla on suuremmat jäykkyys- ja lujuusominaisuudet sekä pienempi kosteusvaurioherkkyyys kuin MLA-massoilla alkuvaiheen koestuksissa, mutta tilanne oli jälleen päinvastainen niin luonnollisen vanhenemisen kuin laboratoriovanhentamisen jälkeen. Kosteusvaurioiden estämiseksi suositeltiin, että MLA-päällysteiden annetaan vanheta kesän ajan tai että niihin lisätään tartukkeita ennen kuin ne altistetaan kylmille ja märille olosuhteille. (Epps Martin ym. 2014).

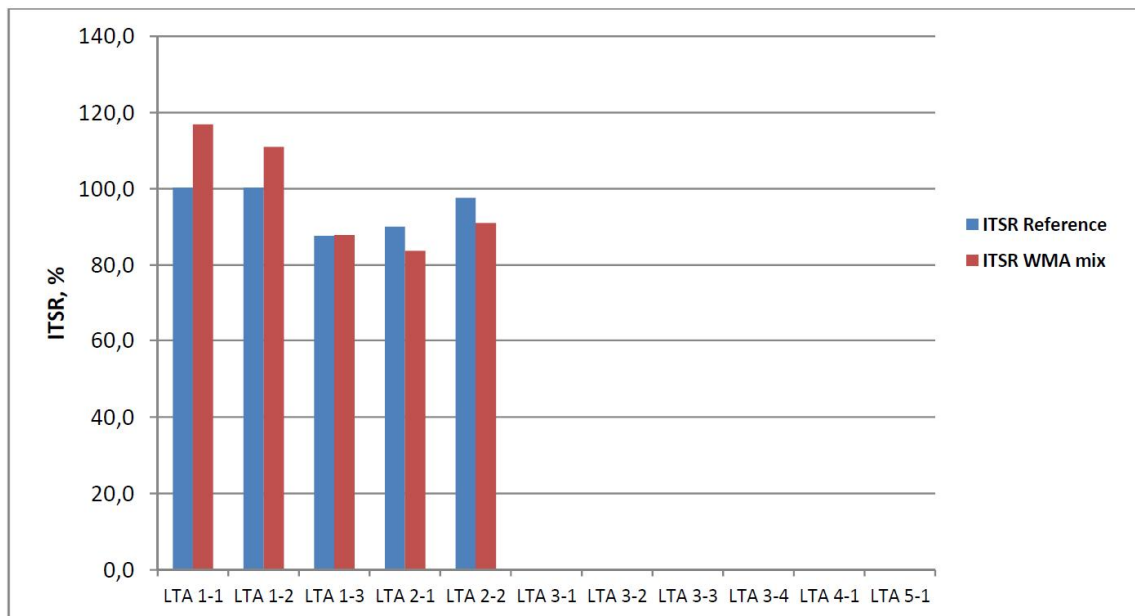
Bonaquist (2011) selvitti lyhytaikaisesti laboratoriossa vanhennettujen KA- ja MLA -näytteiden kosteusvaurioherkkyyttä vertailemalla niiden HVL-suhdelukuja, joiden havaittiin olevan tyypillisesti erilaisia KA- ja MLA-massoilla. Tartukkeita sisältävien MLA-massojen HVL-suhdelukujen havaittiin yleensä pysyvän samoina tai parantuneen verrattuina KA-massaan ja puolestaan tartukkeettomien MLA-massojen HVL-suhdeluvut olivat yleensä samoja tai pienempiä kuin KA-massoilla. Tutkimustulos ei ole yllättävä, mutta kuitenkin on hyvä pitää mielessä, että osalla tartukkeettomista MLA-massoista saatiin jopa KA-massoja vastaavia tuloksia.

Norjalaisessa LTA2011-tutkimuksessa selvitettiin kiviaineksen ja sideaineen välistä tartuntaa rullapullokokeen sekä HVL-kokeiden perusteella. Kuitenkaan kaikille asfalttimassoille

ei ilmoitettu tuloksia. Tutkimuksen tartuntatuloksia on esitetty kuvissa 14 ja 15, joista ensimmäisestä nähdään rullapullokokeen peittoaste 48 tunnin jälkeen sekä toisesta kuivana ja märkänä koestettujen kappaleiden HVL-tulosten suhdelukuja. Myöskään HVL-kokeiden koestuslämpötilaa tai nopeutta ei ilmoitettu tutkimuksen raportissa.



Kuva 14. Rullapullokoekokeiden tuloksia LTA2011 tutkimuksessa (FAV 2011).



Kuva 15. HVL-suhdelukuja kuivana ja märkänä koestetuille kappaleille LTA2011 tutkimuksessa (FAV 2011).

Tutkimuksen tuloksista nähdään, että Green Asphalt -massan tartunta on hieman vertailumassaa parempi ja HVL-suhdeluku on vertailumassaa vastaava, mikä viittaa amiinien käyttöön tartukkeina. LMK foam -massalle ei ilmoitettu tuloksia.

3.5 Vaikutuksia asfalttimassan suunnitteluun

Useissa tutkimuksissa on todettu, että etenkin orgaaniset lisäaineet muuttavat sideaineen ominaisuuksia ja siten myös esimerkiksi päällysteen jäykkyyttä. Myös sideaineen vähäisempi vanheneminen muuttaa osaltaan sideaineelta odotettuja ominaisuuksia. Asfalttinormien mukaan sideaine kovenee asfalttimassan valmistuksen aikana hapettumisen vuoksi tavallisesti yhden bitumiluokan (PANK ry 2011). Mahdolliset muutokset sideaineen ominaisuuksissa tulee siis ottaa huomioon MLA-massaa suunniteltaessa, jotta esimerkiksi vältetään alku-urautumiselta.

Matalalämpöasfalttien suunnittelussa suositellaan käytettäväksi saman luokan sideainetta kuin vastaavan KA:n suunnittelussa. MLA:n valmistuslämpötilan on havaittu parantavan hieman sideaineen PG-luokitusta kylmissä olosuhteissa sideaineen vähäisemmän vanhenemisen ansiosta. Kuitenkin erittäin suurien valmistuslämpötilan alennusten yhteydessä voi olla tarpeellista kasvattaa sideaineen PG-luokituksen korkeiden lämpötilojen arvoa urautumisen välttämiseksi. (Bonaquist 2011). Kuitenkin esimerkiksi käytettäessä orgaanista Sasobit®-vahaa ja PG 58-28 -sideainetta on havaittu, että käyttölämpötiloissa saavutetaan samanlaisia ominaisuuksia kuin PG 64-22 -sideaineella (Hurley & Prowell 2005), eikä pelkällä Sasobit®-vahalla saavuteta merkittävää eroa sideaineen viskositeetissa valmistuslämpötiloissa (Zaumanis 2010). Toisin sanoen käytettäessä orgaanisia lisäaineita sideaineen PG-luokitus voi nousta, mikä tarkoittaa, että MLA:n suunnittelussa tulisi käyttää yhtä PG-luokkaa alemmaa sideainetta. Pehmeämmällä sideaineella saavutetaan myös sopiva sekoitusviskositeetti matalammissa lämpötiloissa.

MLA-prosessien on sanottu olevan hyödyllisiä käytettäessä asfalttirouhetta, sillä matalampi valmistuslämpötila vähentää sideaineen vanhenemista, mikä kompensoi asfalttirouheen ikääntyneen sideaineen jäykkyyttä (D'Angelo ym. 2008). Asfalttirouheen ja lisätyn sideaineen on havaittu sekoittuvan hyvin matalalämpöasfalttien valmistuslämpötiloissa, jos asfalttimassaa pidetään sopivassa lämpötilassa riittävän kauan. Tutkimuksessa on havaittu, että pidettäessä asfalttimassaa tiivistyslämpötilassa kahden tunnin ajan asfalttirouheen sideaine sekoittui hyvin uuden sideaineen kanssa. Edellytyksenä on kuitenkin, että MLA:n suunniteltu tiivistyslämpötila on korkeampi kuin asfalttirouheesta talteenotetun sideaineen PG-luokituksen korkeiden lämpötilojen arvo. (Bonaquist 2011).

Kristjansdottir ym. (2007) mukaan kahdella eri kohteella tehdyissä kokeissa havaittiin, että Sasobit®-vahaa voidaan käyttää edistämään massan työstettävyyttä ja tiivistettävyyttä käytettäessä asfalttirouhetta. Sasobit®-vahaa lisättiin molemmissa kokeissa vain noin 1,5 %, sillä päätarkoituksena ei ollut valmistuslämpötilan alentaminen, jolloin vahaa käytetään tyyppillisesti 2 – 4 %. Kuitenkin toisella koekohteella asfalttimassan valmistus- ja tiivistyslämpötilat olivat noin 20 °C vertailumassaa matalammat. Tutkimuksissa käytetyn vahamäärän havaittiin lisäävän hieman päällysteen jäykkyyttä korkeissa käyttölämpötiloissa vaikuttamatta sen jäykkyyteen tavallisissa tai matalissa lämpötiloissa. Vähäisellä Sasobit®-vahan määrällä ei myöskään havaittu olevan merkittäviä vaikutuksia päällysteiden urautumiseen eikä väsymis- tai pakkashalkeiluun.

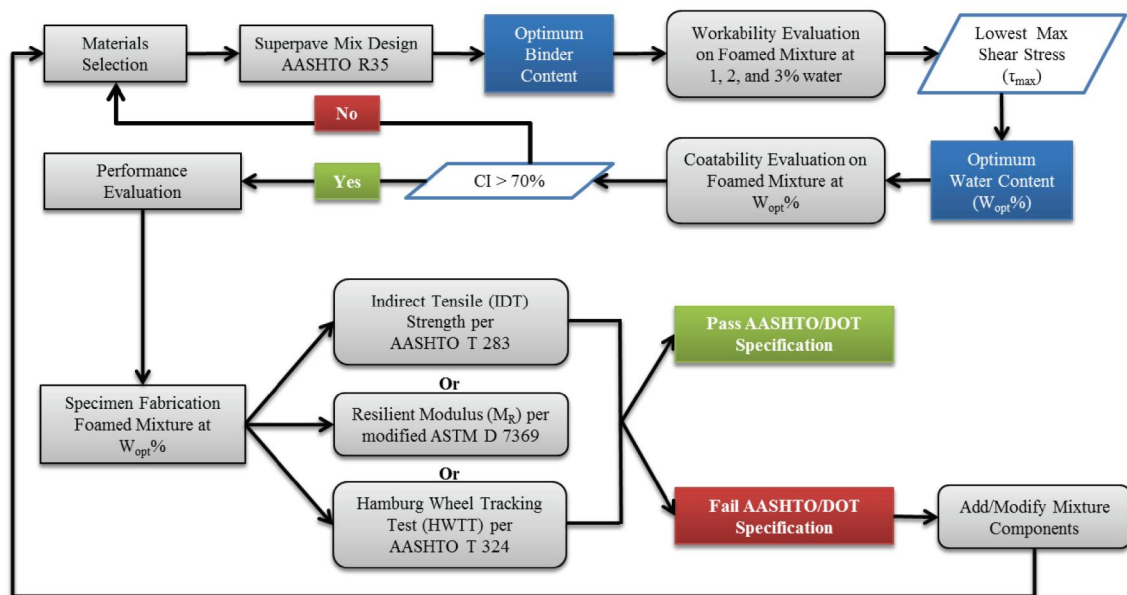
Tutkimuksien tarkoituksena oli selvittää Sasobit®-vahalla saavutettavia hyötyjä käytettäessä suuria asfalttirouhepitoisuuksia. Tutkimuksissa käytetyt asfalttirouhepitoisuudet olivat 35 % ja 45 %, jotka eivät ole kovin suuria, sillä Suomessa 50 % asfalttirouhepitoisuus on hyvin tavallinen. Kuitenkin molemmilla koekohteilla havaittiin, että vastaava asfalttimassa,

joka ei sisältänyt Sasobit®-vaahaa oli vaikeampaa työstää ja sen tiivistämiseen tarvittiin useampia ylityksiä jyrällä (Kristjansdottir ym. 2007). Saksassa on tehty kokeiluja, joissa on käytetty jopa 90 % tai 100 % asfalttirouhetta sekä Aspha-min-zeoliitteja ja Sasobit®-vaahaa (D'Angelo ym. 2008). Jopa 90 % asfalttirouhetta sisältävän matalalämpöasfaltin on sanottu olevan paremmin tiivistettävissä. (Zaumanis 2010).

Suomessa asfalttirouheen käyttöä rajoittavat asfalttinormit, joissa on määritetty asfalttirouheen enimmäismääräksi 50 % kulutuskerroksissa ja 70 % muissa sidotuissa rakennekerroksissa. Suurempien määrien käyttö voi kuitenkin olla mahdollista tapauskohtaisesti tilaajan määrittelemissä kohteissa, joissa kiviaineksen luokkavaatimuksena on A_N14 tai A_N19. (PANK ry 2011). Lisäksi asfalttibetonien tuotestandardissa edellytetään, että jos asfalttirouhe tai valmistettava massa sisältää modifioitua sideainetta tai modifioivaa lisäainetta asiakkaan ja valmistajan tulee sopia asfalttirouheen käytöstä, jos sitä on tarkoitus käyttää kulutuskerroksessa yli 10 % tai tasaus-, side- ja kantavassa kerroksessa yli 20 % (SFS-EN 13108-1 + AC). Useat MLA-prosessit perustuvat jossain mielessä sideaineen modifiointiin, mikä tarkoittaa, että käytettäessä yli 10 – 20 % asfalttirouhetta asfalttibetonien tuotestandardi edellyttää osapuolien sopimusta.

Etenkin käytettäessä asfalttirouhetta matalalämpöasfaltin tiivistymistä on kuitenkin hyvä testata eri lämpötiloissa. Lämpötilan vaikutusta asfalttimassan tiivistymiseen on tutkittu laskemalla kiertotiivistimen kierrosten lukumäärä, jolla saavutetaan 92 % suhteellisesta tiiveydestä eli kappaleitiheyden ja maksimitiheyden suhteesta ja vertaamalla sitä tarvittavaan kierrosten lukumäärään, jotta sama tiiveys saavutetaan 30 °C:a matalammalla tiivistyslämpötilalla. Jos testattavan MLA:n tiivistämiseen tarvittavien kierrosten lukumäärä kasvaa yli 25 %, testi osoittaa, että MLA on herkempi lämpötilan muutokselle kuin vastaava KA. Testiin vaikuttavat luonnollisesti tiivistyslämpötila, MLA:n valmistusmenetelmä sekä asfalttirouheen määrä. (Bonaquist 2011).

Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa selvitettiin miten asfalttimassojen suunnittelussa kannattaa ottaa huomioon erilaisten vaahdotusmenetelmien vaikutuksia. Matalalämpöasfaltit ja etenkin vaahdotusmenetelmät ovat Yhdysvalloissa hyvin suosittuja, sillä vuonna 2012 Yhdysvalloissa valmistettiin 86,7 miljoonaa tonnia matalalämpöasfalttia, josta noin 88 %:ssa käytettiin mekaanista vaahdotusmenetelmää. Tutkimuksessa havaittiin esimerkiksi, että erilaiset sideaineet käyttäytyvät eri tavoin vaahdotuksen yhteydessä. Toinen suuri huomio tutkimuksessa oli, että vaahdotuksessa on optimivesipitoisuus, joka vaihtelee vaahdotustekniikan ja asfalttimassan suunnittelun vaikutuksesta. Erilaisten vaahdotuslaitteiden välillä havaittiin myös huomattavia eroja esimerkiksi sideaineen laajentumisen osalta samalla vesipitoisuudella. Vesipitoisuuden vaikutuksia havaittiin laboratoriokokeissa, joissa testattiin asfalttimassojen työstettävyyttä ja kiviaineksen peittymistä. Kokeiden perusteella todettiin, että 1 %:n vesipitoisuudella työstettävyys ja peittyminen olivat parempia kuin vertailtavalla KA:lla, mutta 2 % ja 3 % vesipitoisuudella tulokset olivat vertailumassaa vastaavia tai huonompia. Yksi tutkimuksen päätavoitteista oli laatia ehdotus suunnittelumenetelmästä vaahdotusmenetelmillä valmistettaville matalalämpöasfalteille. Ehdotettu suunnittelumenetelmä on esitetty kuvassa 16. (Newcomb ym. 2015).

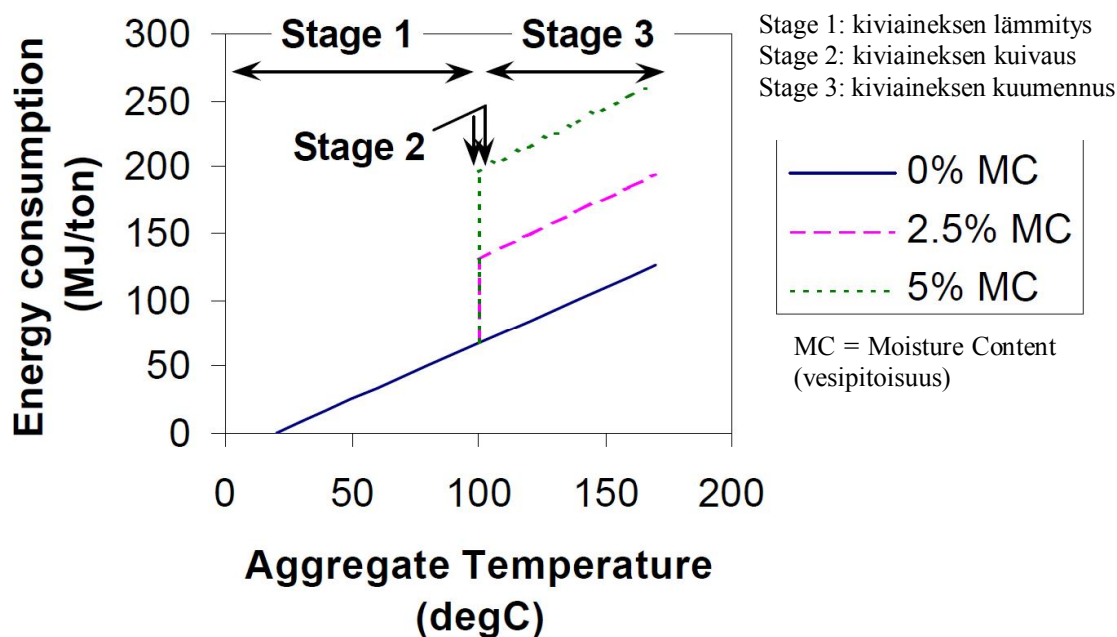


Kuva 16. Ehdotettu suunnittelumenetelmä vaahdotusmenetelmiä hyödyntäville matalalämpöasfalteille (Newcomb ym. 2015).

3.6 Energiankulutus, päästöt ja päällysteen hinta

Matalalämpöasfalttien valmistamisen on sanottu kuluttavan tyypillisesti 20 – 35 % vähemmän polttoainetta verrattuna perinteisiin asfalttimassoihin, mutta vaihteluväli voi olla jopa suurempi, jos kiviaineksen kuivauksessa käytetyn polttimen säätöjä parannetaan. PMLA-massoilla säästöt energiankulutuksessa ovat vielä suurempia, sillä kiviaineksen täydellinen kuivaaminen kuluttaa hyvin suuren määrän energiaa. Energiankulutuksen muutoksen analysoinnissa ei usein oteta huomioon muutoksia asfalttimassan sekoittamiseen ja materiaalin liikuttamiseen vaadittavassa sähkönkulutuksessa. (D'Angelo ym. 2008).

Kuten kuvasta 2 nähdään, PMLA-massan valmistaminen kuluttaa merkittävästi vähemmän polttoainetta kuin MLA- tai KA-massan valmistaminen. Syynä on luonnollisesti lämpötilan nostaminen yli 100 celsiusasteen eli kiviaineksen kuivaus, mikä kuluttaa paljon energiaa. Jenkins ym. (1999) mukaan kiviaineksen lämpötila sekoituksen aikana määrää pääosin lopullisen seoksen lämpötilan. Tutkimuksessa on osoitettu, että jopa 180 °C:sen vaahdotetun sideaineen lisääminen kiviaineksen sekaan nosti seoksen lämpötilaa vain noin 7 – 10 °C. Esimerkiksi jos alle 30 °C:n kiviaineksen sekaan syötetään vaahdotettua sideainetta, jonka lämpötila on hieman yli 100 °C, lopullisen massan lämpötila on vain noin 38 °C. Lisäksi vaahdon hajoamisnopeus kasvaa, mitä suurempi sideaineen ja kiviaineksen lämpötilaero on. Kiviaineksen kokonaisvaltainen kuivaaminen kuluttaa kuitenkin valtavasti energiaa, sillä veden höyrystyminen vaatii teoriassa 500-kertaisesti energiaa verrattuna yhden °C:n lämpötilan nostoon. Kuvassa 17 on esitetty kiviaineksen vesipitoisuuden vaikutuksia kiviaineksen kuivaamisen teoreettiseen energiankulutukseen. Kuvasta poiketen energiankulutus on todellisuudessa hieman suurempi, koska laskennassa ei otettu huomioon esimerkiksi lämpösäteilystä aiheutuvaa häviötä. (Jenkins ym. 1999).



Kuva 17. Energiankulutus kiviainesta lämmitettäessä eri vesipitoisuuksilla (muokattu lähteestä Jenkins ym. 1999).

Energiankulutuksen vähentämiseksi on suositeltu mahdollisimman kuivan kiviaineksen käyttöä asfalttimassan valmistuksessa. Kiviaineksen kosteuden minimointia voidaan toteuttaa asfalttiasemalla esimerkiksi kattamalla kiviainekasat ja kuljetushihnat. Euroopassa käytetyn kiviaineksen veden absorption on mainittu olevan alle 2 %, kun taas Yhdysvalloissa käytetyn kiviaineksen absorptio on huomattavasti suurempi eli Euroopassa vesipitoisuuden minimoinnilla ei ole yhtä suurta vaikutusta kuin Yhdysvalloissa. (D'Angelo ym. 2008). Prowell ym. (2014) mukaan laskemalla kiviaineksen vesipitoisuutta yhdellä prosentilla voidaan saavuttaa lähes yhtä suuria säästöjä polttoaineenkulutuksessa kuin KA:n ja MLA:n välillä keskimäärin.

Polttoaineenkulutus perinteisen asfalttimassan valmistuksessa vaihtelee kiviaineksen vesipitoisuuden lisäksi useista syistä, mutta esimerkiksi Skolnik ym. (2013) mukaan dieselöljyn kulutus on keskimäärin noin 2 gal/ton ($\approx 8,3$ l/t). Kristjansdottir (2006) puolestaan mainitsi polttoaineenkulutuksen vaihtelevan Islannissa 8 – 10 l/t välillä, mutta toisaalta Kristjansdottir ym. (2007) mukaan vaihteluväli on 2 – 3 gal/ton ($\approx 8,3$ – 12,5 l/t).

Myös matalalämpöasfalttien valmistuksessa polttoaineenkulutus voi vaihdella huomattavasti erilaisten valmistusmenetelmien mukaan. Zaumanis (2010) esittää, että merkittävimmän polttoainesäästöihin vaikuttavat kuitenkin valmistuslämpötilan muutoksen suuruus sekä polttoaineen tyyppi. Rahallisten säästöjen suuruuteen vaikuttavat suoraan myös käytetyn polttoaineen hinta ja tyyppi, sillä mitä kalliimpaa polttoaine on, sitä suuremmat säästötkin ovat. Monu ym. (2015) mukaan säästöt polttoaineenkulutuksessa ovat orgaanisilla lisäaineilla 35 %, vaahdotusmenetelmillä 11 – 20 % ja kemiallisilla lisäaineilla jopa 50 %. Prowell ym. (2012) mukaan esimerkiksi LEAB- ja LEA-menetelmillä, joissa kiviainesta ei lämmitetä yli 100 °C:n, vähennykset voivat olla jopa yli 50 %. Kuitenkin D'Angelo ym. (2008) esittää, että LEAB-menetelmällä on raportoitu 40 % vähennyksiä ja käytettäessä 50 % asfalttirouhetta vähennys on ollut 30 %. Skolnik ym. (2013) mukaan Yhdysvalloissa FHWA on

asettanut ohjeelliseksi polttoainesäästöksi 20 %. Prowell ym. (2014) mukaan useiden koe-kohteiden mittausten perusteella polttoaineenkulutus oli 22,1 % pienempi valmistettaessa MLA:a verrattuna KA:n valmistukseen valmistuslämpötilojen eron ollessa keskimäärin 27 °C. Kuitenkin eräällä koekohteella havaittiin, että pelkästään asfalttiaseman polttimen sää-
tämällä saavutettiin 24,8 % pienempi polttoaineenkulutus. He havaitsivat myös, että yh-
dessä vertailtavassa projektissa käytetyn kiviaineksen vesipitoisuus oli keskimäärin 1,8 %
pienempi, minkä ansiosta KA-massan valmistuksessa kului 39,3 % vähemmän polttoainetta
kuin muiden projektien KA-massojen valmistuksessa keskimäärin. Laskennallisten poltto-
ainesäästöjen havaittiin olevan pienempiä kuin mitattujen, minkä syyksi arvioitiin vähäisem-
pää lämpöhäviötä asfalttiasemalla matalammissa valmistuslämpötiloissa. Hyvin eristetyillä
asfalttiasemilla polttoaineen kulutuksen ei siis odotettu laskevan yhtä paljon. (Frank ym.
2011, Prowell ym. 2014).

Taulukkoon 4 on koottu eri maista raportoituja päästövähennyksiä, joita on saavutettu
MLA:lla verrattuna perinteiseen kuuma-asfalttiin. Yhdysvalloissa havaittiin puolestaan nou-
sua CO- ja VOC-päästöissä, minkä syyksi arveltiin polttoaineen epätäydellistä palamista.
Euroopassa vastaavaa nousua ei havaittu, koska asfalttiasemien pienemmän koon ansiosta
kiviaineksen kuumennusjärjestelmän säätö matalammalle lämpötilalle on helpompaa.
(D'Angelo ym. 2008).

*Taulukko 4. Eri maista raportoituja päästövähennyksiä asfalttiasemilta valmistettaessa ma-
talalämpöasfalttia (muokattu lähteestä D'Angelo ym. 2008).*

Päästö	Norja	Italia	Alankomaat	Ranska
CO ₂	31,5 %	30–40 %	15–30 %	23,0 %
SO ₂	-	35,0 %	-	18,0 %
VOC	-	50,0 %	-	19,0 %
CO	28,5 %	10–30 %	-	-
NO _x	61,5 %	60–70 %	-	18 % (NO ₂)
Pöly	54,0 %	25–55 %	-	-

Pohjois-Amerikkalaisten kokemusten mukaan esimerkiksi Double Barrel® Green -menetel-
mällä voidaan alentaa energiankulutusta 11 – 14 %, mutta tutkimuksessa havaittiin, että me-
netelmää käytettäessä MLA:n valmistuksessa kului jopa 24 % vähemmän polttoainetta kuin
vastaavaa KA:a valmistettaessa. Molemmat asfalttimassat sisälsivät 15 % asfalttirouhetta ja
5 % MSM (manufactured shingle modifier) -rouhetta, jota saadaan käyttämättömästä katto-
huovasta tehtaassa ylijäämästä. Taulukossa 5 on esitetty tutkimuksen energiankulutus- ja pääs-
tömittausten tuloksia. Keskimääräinen KA:n valmistuslämpötila oli kuitenkin 10 °C suunni-
teltua korkeampi, mikä myös vaikuttaa tuloksiin. Double Barrel® Green -prosessilla mitat-
tiin noin 10 % vähennys hiilimonoksidin ja -dioksidin sekä typen oksidien päästöissä verrat-
tuna vastaavan KA:n valmistukseen. Mittauksissa havaittiin kuitenkin pientä kasvua rikki-
dioksidipäästöissä, mutta molempia massoja valmistettaessa rikkidioksidipäästöt olivat
melko pieniä. Kyseessä oli melko uusi asfalttiasema, joka käyttää polttoaineena maakaasua,
minkä ansiosta aseman odotettiin toimivan energiatehokkaasti. (Middleton & Forfyflow
2009).

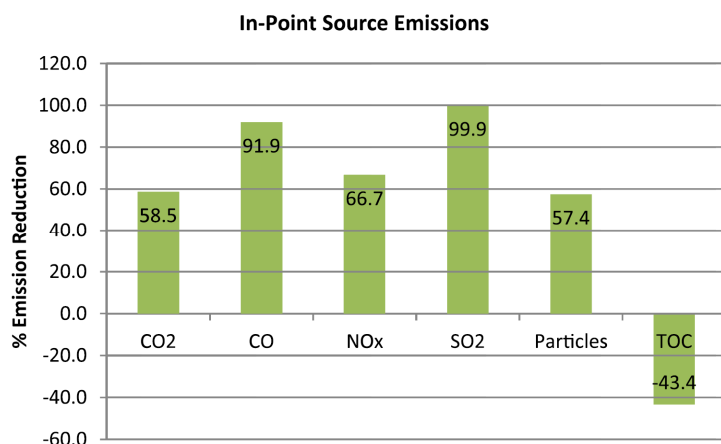
*Taulukko 5. Double Barrel® Green -menetelmän vaikutuksia energiankulutukseen ja pääs-
töihin perinteiseen KA:n verrattuna (muokattu lähteestä Middleton & Forfyflow 2009)*

Massa	w (%)	T _{val.} (°C)	GJ / ton	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)
KA	4,5	169	0,33	15,2	4,6	154	2,1	24
MLA (DBG)	4,2	128	0,25	15,8	4,1	138	2,4	22
Ero (%)			24,4		10,9	10,4	-14,3	8,3

DBG = Double Barrel® Green, w = kiviaineksen vesipitoisuus

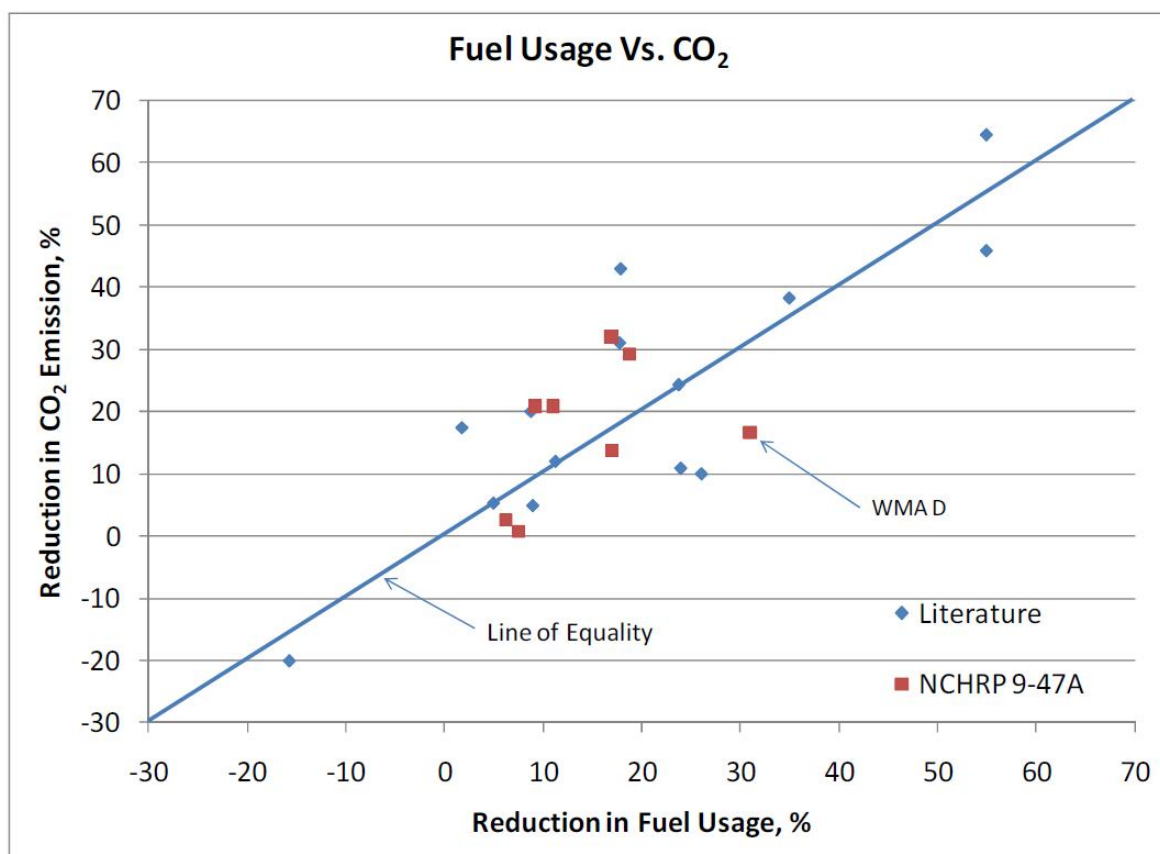
Norjassa tehdyissä mittauksissa havaittiin huomattavia eroja energiankulutuksessa ja päästöissä MLA:n ja KA:n välillä käytettäessä WAM® foam -menetelmää. Useiden päivien aikana tehtyjen mittausten perusteella MLA:n valmistuksessa polttoainetta kului keskimäärin 6,08 l/t ja vastaavan KA:n valmistukseen kului keskimäärin 8,9 l/t. Kiviaineksen vesipitoisuuden keskiarvot olivat MLA:n valmistuksessa 2,3 % ja KA:n valmistuksessa 2,4 %. (Larsen ym. 2004). Toisessa mittauksessa seurattiin polttoaineenkulutusta ja päästöjen määrää suuren mittakaavan päällystystyön yhteydessä. Rumputyypisellä asfalttiasemalla valmistettavissa asfalttimassoissa käytettiin 15 % asfalttirouhetta ja mittaukset toteutti riippumaton säätiö. Polttoaineenkulutus oli MLA:a valmistettaessa jopa 40 % pienempi ja päästöt vähenivät CO₂:n osalta 31,4 %, CO:n osalta 28,5 % sekä typen oksidien osalta jopa 61,5 %. Myös polypäästöt vähenivät noin 50 % MLA:a valmistettaessa. MLA:n ja KA:n valmistuslämpötilojen ero oli noin 40 °C, mikä selittää myös energiankulutuksen ja päästöjen suuria eroja. (FAV 2011, Larsen ym. 2004).

Rubio ym. (2012) perehtyivät tutkimuksessaan KA:n ja PMLA:n valmistuksesta aiheutuviin päästöihin. Valmistettujen asfalttimassojen sanottiin olevan muuten vastaavia paitsi, että KA:ssa käytettiin 4,5 % B50/70-sideainetta, kun taas PMLA:ssa käytettiin 4,7 % C69B3 35/50 -bitumiemulsiota. Kuuma-asfaltti valmistettiin annosasemalla, mutta PMLA-massan valmistusprosessin sanottiin olevan hyvin lähellä KA:n valmistusprosessia rumpuasemalla. KA:n valmistuslämpötilaa ei ilmoitettu tarkasti, mutta prosessissa käytetty kiviaines lämmitettiin ensin 180 °C:n lämpötilaan ja sen annettiin jäähtyä 160 °C:n lämpötilaan ennen sekoittamista 150 °C:sen sideaineen kanssa. PMLA:n valmistusmenetelmässä kiviaines lämmitettiin 100 °C:n lämpötilaan, minkä jälkeen sen sekaan syötettiin bitumiemulsiota, jonka lämpötila oli noin 60 – 70 °C. Valmistuslämpötilojen ero oli täten erittäin suuri, kuten voidaan olettaa vertailtaessa KA- ja PMLA-massoja. PMLA:n valmistusprosessin mainittiin kuluttavan keskimäärin vain 2,5 kg polttoainetta asfalttitonnin kohden käytettäessä kuivaa kiviainesta, kun taas perinteisten asfalttiasemien kulutukseksi ilmoitettiin 6 – 7 kg/t. Energiankulutuksen ero menetelmien välillä oli siis noin 58 – 64 %. Tutkimuksessa mainittiin kuitenkin, että PMLA:a valmistava asfalttiasema on suunniteltu ja tarkasti säädetty vain matalien valmistuslämpötilojen käyttöön, eikä sillä voida valmistaa perinteistä KA:a, mikä myös selittää erittäin suurta eroa energiankulutuksessa. Kuvassa 18 on esitetty tutkimuksessa havaittuja päästövähennyksiä mitattuina asfalttiasemien niin kutsutuista In-Point pisteistä, joiden kautta aseman päästöt kulkevat ilmakehään. Päästövähennyksiä mitattiin myös muissa pisteissä asfalttiasemilla sekä päällystystyön yhteydessä. Kuvasta 18 nähdään kuitenkin, että orgaanisten yhdisteiden kokonaispäästöt olivat merkittävästi suuremmat valmistettaessa PMLA-massaa. (Rubio ym. 2012). Tutkimuksessa ei kuitenkaan otettu kantaa, mistä suuremmat päästöt voisivat aiheutua, mutta orgaaninen hiili päästöissä voisi viitata polttoaineen epätäydelliseen palamiseen.



Kuva 18. PMLA-massan päästövähennyksiä verrattuina KA-massaan (Rubio ym. 2012).

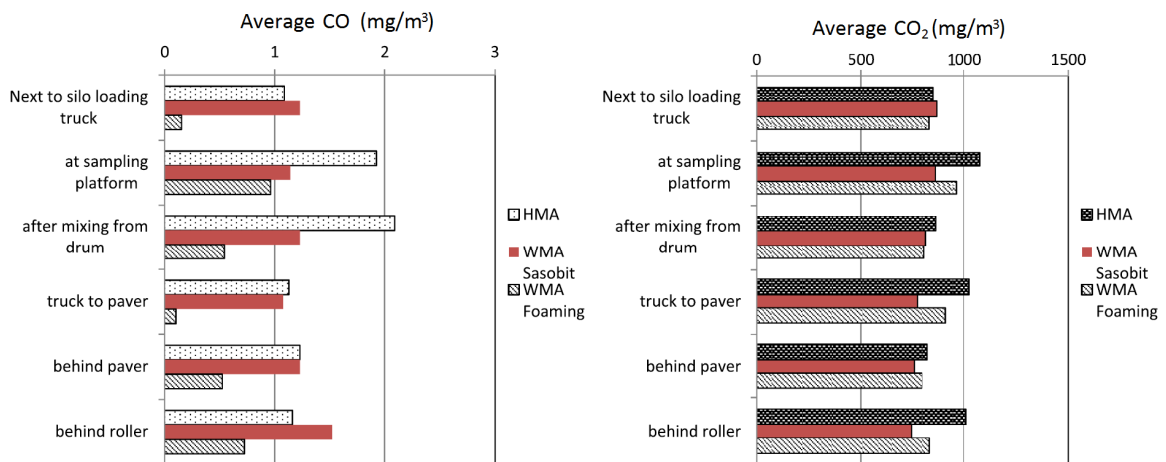
Frank ym. (2011) havaitsema polttoaineen kulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen välinen lineaarinen yhteys on esitetty kuvassa 19, joka perustuu NCHRP 9-47A tutkimuksen mittauksiin sekä sen yhteydessä kerättyihin kirjallisuusarvoihin. Heidän mukaansa hiilidioksidipäästöt ovat käytännössä suoraan verrannollisia polttoaineenkulutukseen ja pisteiden etäisyys suorasta kuvastaa vähintään toisen mittauksen epätarkkuutta. Esimerkiksi kuvan 19 ”WMA D” pisteen polttoainesäästöiksi oli raportoitu 31 %, mutta laskennallisessa tarkastelussa paljastui, että säästöt olivat vain noin 13 %



Kuva 19. Polttoaineen kulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisen välinen yhteys (Frank ym. 2011).

Kuvasta 19 nähdään myös, että tulokset poikkeavat suorasta usein, mikä selittää myös osaltaan eroavaisuuksia eri lähteiden välillä. Niin päästöjen kuin polttoaineenkulutuksen mitauksissa on siis huomattavia virhelähteitä.

Matalalämpöasfalttien on sanottu myös parantavan työolosuhteita, sillä matalampi valmistuslämpötila tarkoittaa, että asfalttimassa myös levitetään matalammassa lämpötilassa. Ranskasta, Saksasta ja Italiasta kerätyn tiedon mukaan MLA:a levitettäessä työntekijät altistuvat huomattavasti vähemmille päästöille verrattuna perinteisen KA:n levittämiseen. Kuitenkin myös KA:n levityksessä altistumisen sanottiin pysyvän raja-arvojen sisällä, mutta etenkin aerosolien ja PAH-yhdisteiden määrä ilmassa oli huomattavasti matalampi MLA:a levitettäessä. Pienempien päästöjen on havaittu vaikuttavan positiivisesti myös työntekijöiden viihtyvyyteen ja tehokkuuteen. (D'Angelo ym. 2008). Kuvassa 20 on esitetty eri paikoista mitattuja CO- ja CO₂-pitoisuuksia asfalttiasemalla sekä levityskohteella. Kuvasta nähdään, että vaahdotusmenetelmällä valmistetusta MLA:sta aiheutuvat päästöt ovat tyypillisesti pienempiä kuin KA:lla, mutta Sasobit®-vaahaa hyödynnettäessä päästöjen havaittiin jopa nousseen joissakin tapauksissa.



Kuva 20. Keskimääräisiä CO- ja CO₂-päästöjä eri mittauspaikoista (Mohammad ym. 2014).

Sideaineesta aiheutuvien PAH-päästöjen määrä lämpötilan funktiona on eksponentiaalinen, sillä Saksassa tehdyn tutkimuksen mukaan alle 80 °C:n lämpötilassa 100 gramman bitumi-näytteestä ei käytännössä aiheudu päästöjä ja jopa 150 °C:n lämpötilassa kokonaispäästöt ovat vain noin 1 mg/h. Kuitenkin 180 °C:n lämpötilassa useista bitumilaaduista aiheutui merkittäviä päästöjä. Kokonaispäästöt olivat esimerkiksi sideaineella 30/45 13,0 mg/h ja si-deaineella 160/220 7,0 mg/h, mutta 50/70- ja 70/100-bitumeista aiheutuneet päästöt olivat vain 2,2 mg/h ja 3,5 mg/h. (Rühl & Lindemeier 2006). Tulosten eroavaisuuksiin vaikuttanevat esimerkiksi sideaineiden alkuperä sekä koostumuksien erot.

Keches & LeBlanc (2007) tutkivat sideaineesta sekä asfalttimassasta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen määrää hallitussa lämpötilassa valitulla aikavälillä. Tutkimuksessa näytteitä suljettiin lasipulloon, minkä jälkeen pullot asetettiin uuniin valittuun lämpötilaan. Valitun vanhenemisajan jälkeen pullot poistettiin uunista ja niiden sisällä olevan ilman hiilidioksidipitoisuus mitattiin. Mittaukset tehtiin Dräger-putkilla ja useissa pitkän aikavälin kokeissa putkien mittauskapasiteetti ylittyi välittömästi mittauksen alussa. Tutkimuksen mittauks-tuloksia on esitetty taulukoissa 6 ja 7. Tutkimuksessa mitattiin myös sideainenäytteiden osalta

hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöjä, mutta mittaukset ylittivät mittauslaitteiston kapasiteetin suurilta osin, mistä syystä tuloksia ei ole esitelty tässä yhteydessä.

Taulukko 6. Sideainenäytteistä aiheutuvien CO₂-päästöjen mittaustuloksia (muokattu lähteestä Keches & LeBlanc 2007).

Aikaväli	T _{vanh.} (°C)	m _{sideaine} (g)	CO ₂ (ppm)
24 h	130	199,1	2500
24 h 20 min	160	199,0	>3000
24 h	120	50,5	1400
24 h 20 min	170	50,0	>3000
2 h	125	27,5	600
2 h	150	30,0	800
2 h	170	25,0	1300

Taulukko 7. KA- ja MLA-massoista aiheutuvien CO₂-päästöjen mittaustuloksia (muokattu lähteestä Keches & LeBlanc 2007).

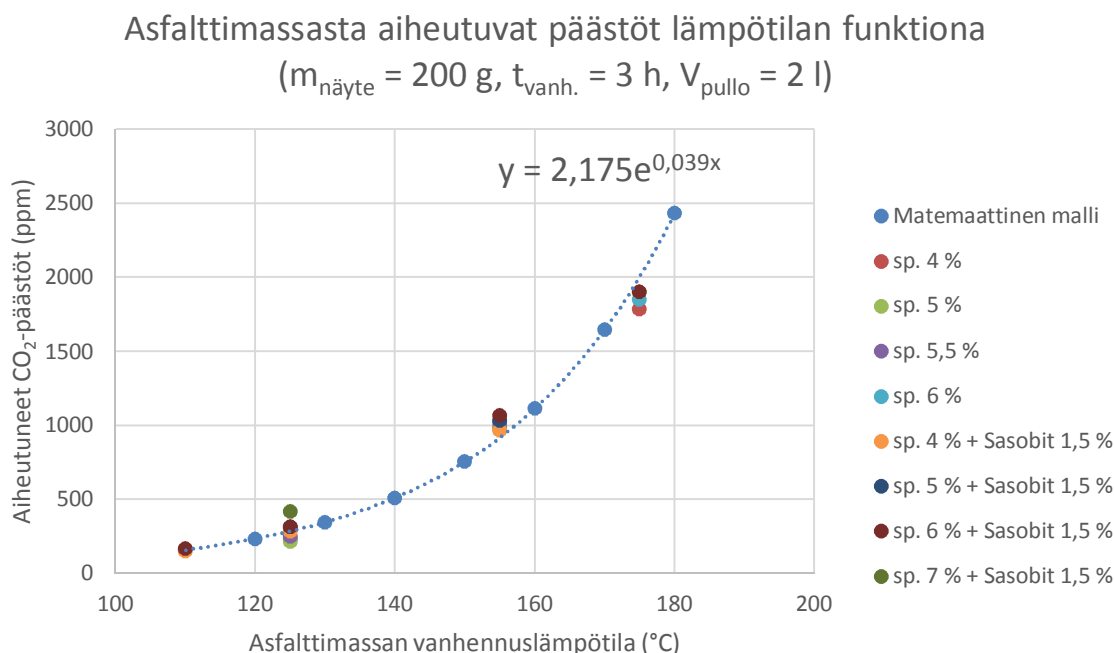
Massa	Sasobit® (%)	T _{vanh. 2h} (°C)	m _{massa} (g)	Si- deainepit. (%)	CO ₂ (ppm)	CO ₂ ka. (ppm)
KA	0	150	61,2	5,7	700	716,67 416,67*
KA	0	150	59,5	5,3	700	
KA	0	150	60,7	5,3	750	
MLA	1	130	61,3	5,6	550	516,67 216,67*
MLA	1	130	62,3	5,4	550	
MLA	1	130	62,7	4,8	450	

*Asfalttimassasta aiheutuvat keskimääräiset CO₂-päästöt, kun ympäröivän ilman CO₂-pit. = 300 ppm

Keches & LeBlanc (2007) mukaan hiilidioksidia on keskimäärin noin 300 ppm ympäröivässä ilmassa. Kaksi tuntia 150 °C:n lämpötilassa vanhennetuista noin 60 gramman KAnäytteistä mitattiin aiheutuneen keskimäärin siis noin 417 ppm hiilidioksidia kahden litran lasipulloon. Lisäksi heidän mukaansa MLA-massasta aiheutuu 130 °C:n lämpötilassa keskimäärin noin 48 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin KA-massasta 150 °C:n lämpötilassa, sillä vastaavissa kokeissa MLA-massasta aiheutui CO₂-päästöjä keskimäärin noin 217 ppm.

Mallick & Bergendahl (2009) toteuttivat samankaltaisen tutkimuksen kuin Keches & LeBlanc, mutta hieman suuremmassa laajuudessa. Tutkimuksen tarkoituksena oli muun muassa selvittää lämpötilan vaikutusten lisäksi sideainepitoisuuden ja Sasobit®-vahan vaikutuksia asfalttimassasta aiheutuviin CO₂-päästöihin. Tutkimuksen toimintamalli oli hyvin samanlainen kuin Keches & LeBlanc tutkimuksessa, mutta merkittävimmät erot olivat suurempi näytekeko (200 g) sekä pidempi vanhennuksen aikaväli (3 h). Myös Sasobit®-vahan pitoisuus oli suurempi (1,5 %) ja sideainepitoisuudet vaihtelivat 4 – 7 % välillä. Tutkimuksen aikana seurattiin myös ympäröivän ilman hiilidioksidipitoisuutta ja arvoksi saatiin 450 ppm. Kaikissa tuloksissa otettiin huomioon ympäröivän ilman CO₂-pitoisuus erottamalla sen arvo mitatuista arvoista. Kuvassa 21 on esitetty tutkimuksen mittaustulosten (aiheutuneet päästöt)

keskiarvoja sekä tutkimuksessa luotu matemaattinen malli, jonka avulla voidaan laskea asfalttimassasta aiheutuvien CO₂-päästöjen määrä lämpötilan funktiona.



Kuva 21. Asfalttimassasta aiheutuvat päästöt lämpötilan funktiona (muokattu lähteestä Mallick & Bergendahl 2009).

Tutkimuksessa selvisi, että Sasobit®-vahalla ei ole suoraa vaikutusta CO₂-päästöihin ja vaikka sideainepitoisuuden sanottiin mitä luultavammin vaikuttavan päästöihin ei sen vaikutusta pystytty mittaamaan laitteiston epätarkkuuden takia, joten sen vaikutus oletettiin merkityksettömän pieneksi. Tutkimuksessa havaittiin, että asfalttimassan lämpötila vaikuttaisi olevan merkittävin muuttuja, joka vaikuttaa asfalttimassasta aiheutuviin päästöihin. (Mallick & Bergendahl 2009).

Mallick & Bergendahl (2009) luoman matemaattisen mallin mukaan MLA-massasta aiheutuu 130 °C:n lämpötilassa noin 54 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin KA-massasta 150 °C:n lämpötilassa, kun taas Keches & LeBlanc (2007) mukaan vastaava luku on 48 %. Tutkimuksissa oli kuitenkin muutamia eroavaisuuksia, jotka saattavat selittää päästövähennysten poikkeavia arvoja.

Kristjansdottirin (2006) mukaan säästöt energiankulutuksessa eivät kuitenkaan riitä kattamaan MLA:n valmistukseen käytettävien lisäaineiden hintaa. Taulukossa 8 on esitetty laskennallisia vaikutuksia asfalttimassatonniin hintoihin eri valmistusmenetelmillä Islannissa. WAM Foam -menetelmällä asfalttitonniin hinta saatiin laskennallisesti pienemmäksi kuin perinteisen KA:n, mutta menetelmä vaatii laitteistohankintoja ja rojaltimaksuja. Kuitenkin esimerkkilaskennassa menetelmän ylimääräiset kustannukset on maksettu takaisin, kun asfalttimassaa on valmistettu noin 40 000 ton. Myös lisäaineiden, kuten Ashpa-min tai Sasobit®, käyttö voi vaatia asfalttiasemaan muutoksia, joiden kustannuksia ei otettu laskennassa huomioon. Laskennassa havaittiin, että Aspha-min- ja Sasobit®-lisäaineisiin perustuvan MLA:n hinta on noin 2 – 3 % suurempi kuin vastaavan KA:n. Epps Martin ym. (2014) mukaan joidenkin valmistusmenetelmien on sanottu nostavan asfalttimassan hintaa noin 3,3

– 4,4 \$ jokaista tonnia kohden, mutta kysynnän kasvun ja laitteistojen saatavuuden parantamisen ansiosta MLA:n hinta on ollut myöhemmin noin 0 – 3,3 \$ suurempi asfalttitonnia kohden.

Taulukko 8. Vaikutuksia asfalttitonnin hintaan (muokattu lähteestä Kristjansdottir 2006).

	KA	WAM Foam	Aspha-min	Sasobit
Hinta (\$ / t)	89	87,7*	91,4	90,9
Hinnan muutos (%)	-	-1,5	2,7	2,1

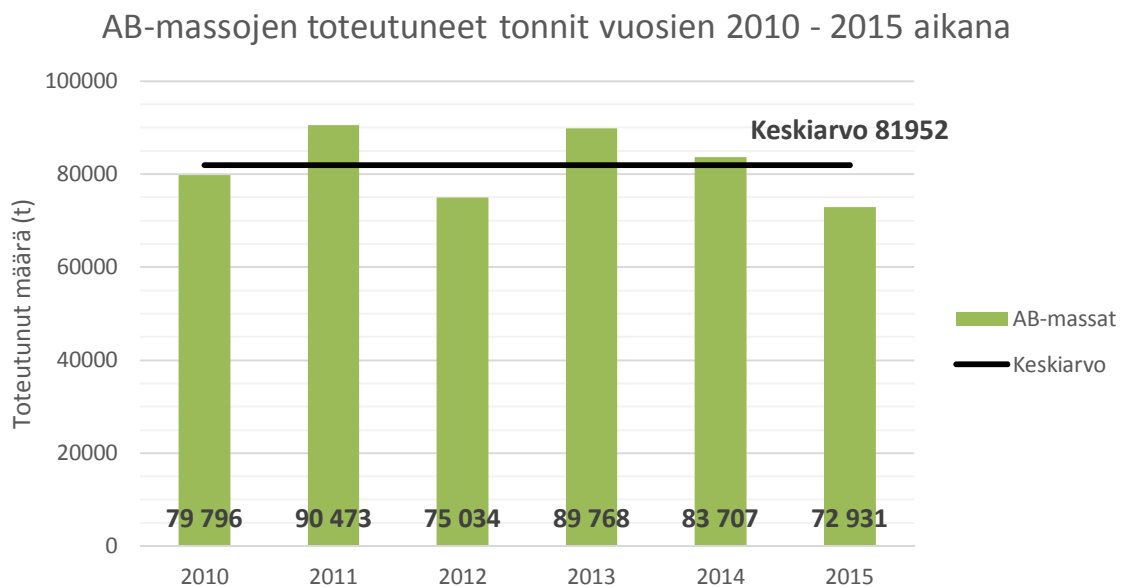
*Ei sisällä laitteiston hintaa tai rojalteja

Matalalämpöasfalttien yhteydessä on mainittu myös muita säästömahdollisuuksia esimerkiksi Hurley & Prowell (2006) havaitsivat Evotherm®-lisäaineen alentavan asfalttimassan optimisideainepitoisuutta, jolloin voidaan säästää sideainetta, joka on asfalttimassan kallein komponentti. Rikkipohjaisten lisäaineiden käyttö asfalttimassassa voi myös alentaa asfalttimassan kokonaiskustannuksia, sillä rikki toimii sideaineen korvaajana. Lehtipuun (1983) mukaan rikkiä voidaan käyttää jopa 20 – 40 % sideaineen massasta, jolloin vastaava määrä sideainetta säästyy. Lisäksi rikkiä voidaan kerätä talteen voimaloiden ja lämmityslaitosten ilmanpuhdistuslaitteista eli se mielletään jäteaineeksi. Rikkipohjaisten lisäaineiden käyttö saattaa kuitenkin vaatia lisäselvityksiä. Zaumanis (2010) esittää puolestaan, että MLA:n avulla voidaan säästää päällystystöissä, koska riittävä tiiveys saavutetaan mahdollisesti vähemmällä jyräyskerroilla. Karjalainen (2015) selvitti opinnäytetyössään asfalttiaseman koko elinkaaren hiilijalanjälkeen vaikuttavien tekijöiden osuuksia ja tutkimuksessa havaittiin että vaahto-bitumia käytettäessä koko elinkaaren hiilijalanjälki on jopa 5 – 7 % pienempi (Karjalainen 2015). Rühl & Lindemeier (2006) mukaan matalammissa lämpötiloissa levitettävät asfalttimassat maksavat enemmän kuin perinteiset asfalttimassat, mutta he korostavat paremman työhyvinvoinnin tärkeyttä taloudellisuuden sijaan. Työterveyden kannalta on kuitenkin hyvä pitää mielessä, että jotkut MLA:n valmistuksessa käytettävät lisäaineet voivat aiheuttaa riskejä työterveydelle, sillä esimerkiksi Rafiee & Javid (2015) mukaan kemiallinen ZycoTherm-lisäaine on itsessään jo myrkyllinen tuote ja voi vaarantaa sitä käsittelevien työntekijöiden terveyden vahingon sattuessa. Lisäksi Prowell ym. (2012) mukaan rikkipohjainen Thiopave™-lisäaine voi muodostaa haitallisia määriä H₂S- ja SO₂-yhdisteitä korkeissa lämpötiloissa.

4 Mahdolliset päästövähennykset Helsingissä

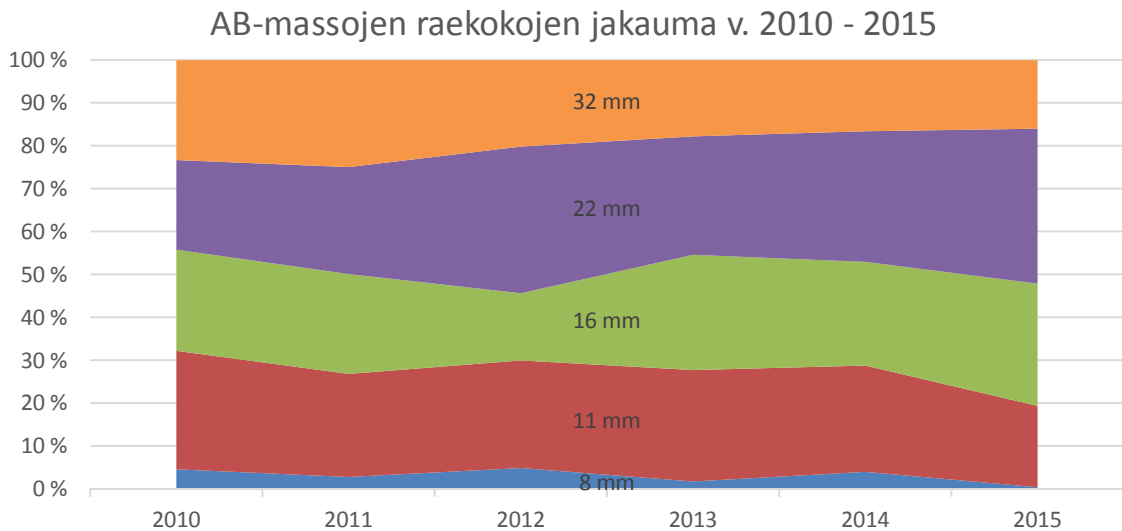
4.1 Asfaltointiurakoiden laajuus

Helsingissä Stara vastaa HKR:n tilaamien päällystystöiden toteutuksesta tilaamalla varsinaiset asfaltointityöt yksityisiltä urakoitsijoilta erillisiin urakoihin hajautetun kilpailutuksen kautta. Asfaltointiurakat ovat jaettu kolmen alueen sekä töiden tyyppin mukaan tyypillisesti siten, että SMA- ja VA-päällysteet tehdään kokonaan omissa urakoissaan, mutta AB-päällysteitä tehdään kolmella alueella niin kutsutuissa suurissa ja pienissä jyräasfaltointiurakoissa eli yhteensä kuudessa erillisessä urakassa. Urakoitsijat ja siten myös matalalämpöasfaltin tarjonta vaihtelevat siis vuosittain, sillä toistaiseksi matalalämpöasfalttia on ollut saatavilla vain kolmelta eri urakoitsijalta. Kuvassa 22 on esitetty AB-massojen toteutuneiden tonnien määrä vuosien 2010 – 2015 välillä. Staran urakoissa levitetään keskimäärin noin 82 000 tonnia AB-massoja vuosittain.



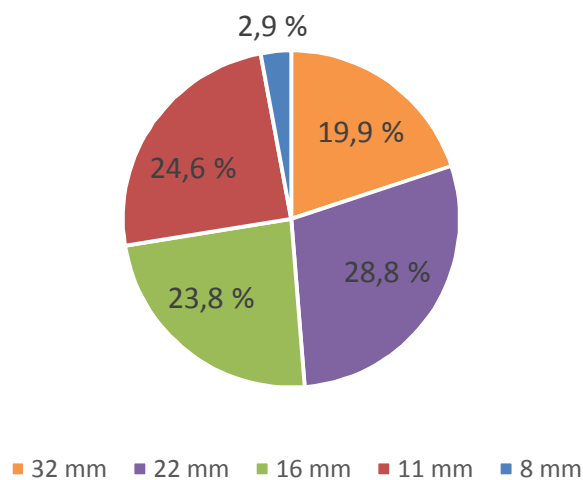
Kuva 22. Staran urakoissa levitettyjen AB-massojen määrä.

Kuvassa 23 on esitetty Staran urakoiden AB-massojen raekoon mukaiset jakaumat vuosien 2010 ja 2015 välillä ja kuvassa 24 on puolestaan keskimääräiset jakaumat samalla aikavälillä. Kuvista nähdään, että noin puolet toteutuneista tonnimääristä on AB 16- ja AB 22-massoja, joita käytetään tyypillisesti ajoratojen kulutuskerroksissa. Keskimäärin ajoratojen kulutuskerroksissa käytetään vuosittain siis noin 43 000 tonnia AB-massoja ja muissa koh-teissa eli kantavissa kerroksissa ja kevyenliikenteenväylillä noin 39 000 tonnia.



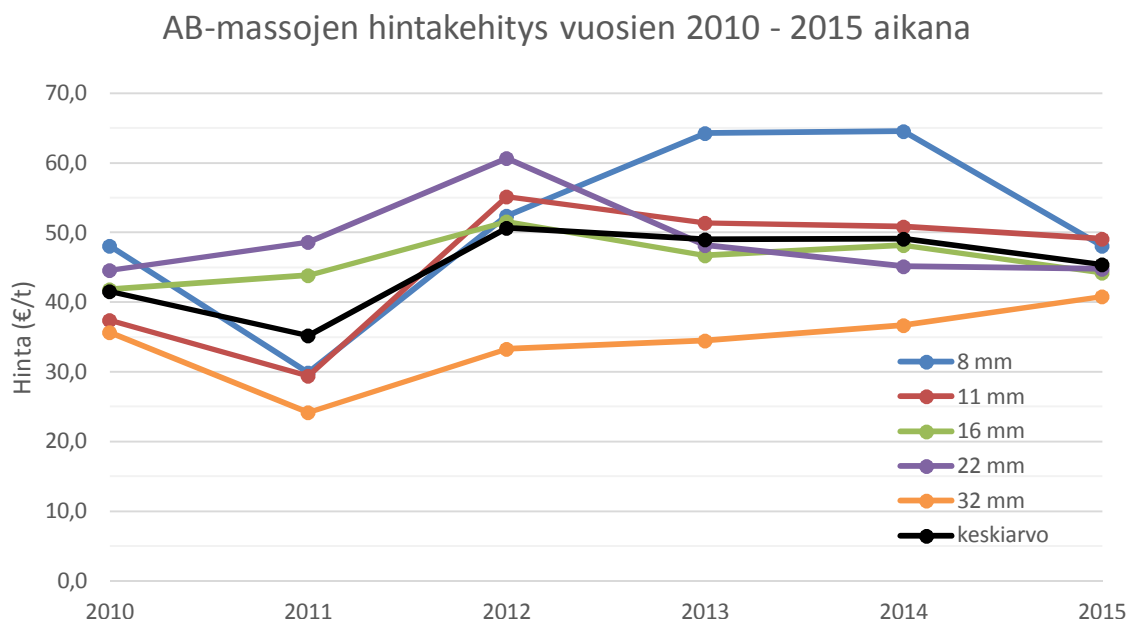
Kuva 23. AB-massojen raekokojen jakauma vuosien 2010 – 2015 aikana.

AB-massojen raekokojen keskimääräinen jakauma v. 2010 - 2015



Kuva 24. AB-massojen raekokojen keskimääräinen jakauma vuosien 2010 - 2015 aikana.

Kuvassa 25 on esitetty AB-massojen hintakehitystä vuosien 2010 – 2015 aikana. Kuvan arvot ovat laskettu toteutuneiden tonnimäärien ja kustannusten summien perusteella. Viime vuonna eri AB-massojen keskimääräiset tonnihinnat vaihtelivat 40 ja 50 €/n välillä, vaikka edellisten vuosien aikana ABK-massa on ollut selvästi muita massoja halvempaa ja AB 22- sekä AB 8-massat ovat olleet muita massoja kalliimpia. Hintaeroja selittää luonnollisesti massan sideainepitoisuus sekä vaatimukset kiviaineksen ominaisuuksien osalta. AB-massojen keskimääräinen tonnihinta on kuitenkin pysynyt melko vakiona viimeisten vuosien aikana eli noin 45 – 50 €/n välillä.



Kuva 25. AB-massojen hintakehitys Staran urakoissa vuosien 2010 - 2015 aikana.

4.2 Mahdolliset päästövähennykset

Kirjallisuusselvitykset vahvistivat työn hypoteesin päästöjen määrän verrannollisuudesta käytettyyn polttoainemäärään. Luonnollisesti asfalttiasemalla tarvitaan asfalttimassan valmistuksessa myös esimerkiksi sähköenergiaa, mutta vertailtaessa KA:n ja MLA:n valmistamista käytännössä ainoa päästöjen kannalta merkitsevä muuttuja on polttoaineenkulutus.

Polttoaineenkulutus KA:n valmistuksessa vaihtelee huomattavasti useasta eri syystä, joista yksi merkittävimmistä on kiviaineksen vesipitoisuus. Myös asfalttiaseman ominaisuudet ja polttimeen säädöt sekä valmistettavan asfalttimassan määrä vaikuttavat polttoaineenkulutukseen eli yksiselitteistä arvoa on mahdoton määrittää. Kuitenkin kirjallisuusselvityksen perusteella havaittiin, että polttoaineenkulutus KA-massaa valmistettaessa vaihtelee 8 – 12 l/t välillä.

Kuten KA-massoilla, MLA-massojen valmistamisessa kuluvan polttoaineen määrä vaihtelee huomattavasti useiden muuttujien takia. Kirjallisuusselvityksessä havaittiin, että vertailtaessa polttoaineenkulutusta KA:n ja MLA:n valmistuksen välillä MLA:n valmistuksessa kuluu noin 10 – 30 % vähemmän polttoainetta ja esimerkiksi FHWA on asettanut ohjeelliseksi polttoainesäästöksi 20 %.

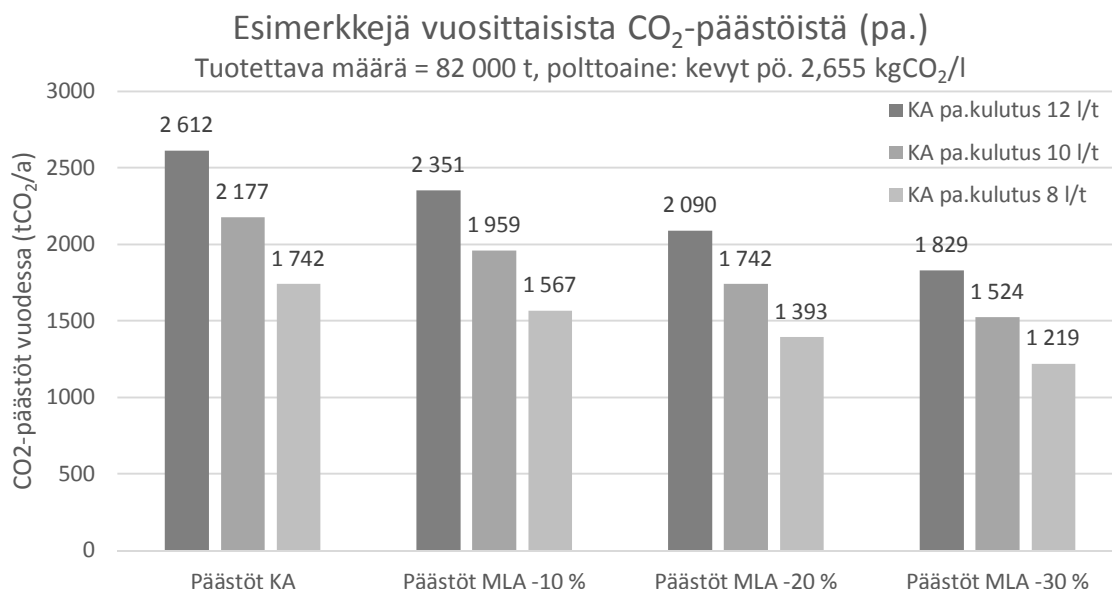
Myös polttoaineiden ominaisuuksilla on vaikutuksia päästöihin, sillä jotkin polttoaineet aiheuttavat suurempia CO₂-päästöjä energiayksikköä kohden kuin muut polttoaineet. Taulukossa 9 on esitetty eri polttoaineiden ominaisuuksia, kuten CO₂-päästökertoimia sekä las kennallisia CO₂-päästöjen määriä litraa kohden. Taulukosta nähdään, että terajoulea kohden raskaasta polttoöljystä aiheutuu 76,1 – 79,2 tonnia CO₂-päästöjä, kun taas vastaava luku dieselöljylle on 61,1 t/TJ ja maakaasulle vain 55,3 t/TJ.

Taulukko 9. Polttoaineiden ominaisuuksia ja niistä aiheutuvien CO₂-päästöjen määriä (muokattu lähteestä Suomen virallinen tilasto 2016).

Polttoaine	CO ₂ oletus päästö- kerroin t/TJ	Tehollinen oletuslämpö- arvo GJ/yks.	Oletusti- heys t/m ³	Tehollinen oletuslämpö- arvo TJ/l	Päästöt kgCO ₂ /l
Dieselöljy	61,1	42,9 / t	0,83	0,00003561	2,176
Kevyt polttoöljy, vähärikkinen	73,5	43,0 / t	0,84	0,00003612	2,655
Kevyt polttoöljy, rikiton	73,5	43,0 / t	0,84	0,00003612	2,655
Raskas polttoöljy, rikkipit. < 0,1 %	76,1	42,1 / t	0,89	0,00003747	2,851
Raskas polttoöljy, rikkipit. < 0,5 %	77,0	41,5 / t	0,91	0,00003777	2,908
Raskas polttoöljy, rikkipit. < 1 %	79,2	40,4 / t	0,99	0,00004000	3,168
Raskas polttoöljy, rikkipit. ≥ 1 %	78,4	40,2 / t	1,00	0,00004020	3,152
Maakaasu	55,3	36,5 / 1000 m ³		0,00003650	2,018

Mahdollisten päästövähennysten esimerkkilaskennassa käytettiin polttoaineena kevyttä polttoöljyä, josta aiheutuvat päästöt ovat 2,655 kgCO₂/l. Polttoaineeksi valittiin kevyt polttoöljy, koska siitä aiheutuvat päästöt edustavat melko hyvin eri polttoaineista aiheutuvien päästöjen keskiarvoa. Tuotettavana määränä käytettiin 82 000 tonnia, mikä vastaa yhden vuoden aikana keskimäärin tuotettavan AB-massan määrää Staran asfaltointiurakoissa.

Kuvassa 26 on esimerkkejä AB-massojen valmistuksesta aiheutuvista CO₂-päästöistä polttoaineen osalta, kun käytettävä polttoaine on kevyttä polttoöljyä ja sen kulutus on 8, 10 tai 12 l/t. Lisäksi kuvassa on esitetty vastaavia vuosittaisia CO₂-päästöjä valmistettaessa MLA-massaa 10, 20 ja 30 % pienemällä polttoaineenkulutuksella.



Kuva 26. Esimerkkejä vuosittaisista CO₂-päästöistä.

Kuvasta nähdään, että AB-massojen valmistukseen käytetystä polttoaineesta aiheutuu noin 1,75 – 2,6 kt CO₂-päästöjä vuodessa, mikä vastaa vain noin 0,06 – 0,09 % Helsingin 2879 kt CO₂-ekv. kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2014. Helsingin kasvihuonekaasupäästöistä

lähes 90 % aiheutuu kaukolämmöstä, kulutussähköstä ja liikenteestä. Teollisuuden ja työkoneneiden osuus kasvihuonekaasupäästöistä oli vuonna 2014 vain 1,4 % eli 39 kt CO₂-ekv. Tähän verrattuna AB-massojen valmistuksessa käytetystä polttoaineesta aiheutuvat päästöt ovat 4,5 – 6,7 %. Taulukossa 10 on esitetty esimerkkilaskelmien päästövähennyksiä verrattuna vuoden 2014 teollisuuden ja työkoneneiden kasvihuonekaasupäästöihin. Taulukosta nähdään esimerkiksi, että vähentämällä polttoaineenkulutusta 20 % voidaan vähentää tarkasteltavia kasvihuonekaasupäästöjä 0,9 – 1,3 %.

Taulukko 10. Päästövähennyksiä teollisuuden ja työkoneneiden kasvihuonekaasupäästöistä

Päästövähennys teollisuuden ja työkoneneiden kasvihuonekaasupäästöistä (v.2014 39 ktCO ₂ -ekv.)	Polttoaineen kulutus KA:n valmistuksessa				
	8 l/t	9 l/t	10 l/t	11 l/t	12 l/t
Päästövähennys MLA -10 %	0,4 %	0,5 %	0,6 %	0,6 %	0,7 %
Päästövähennys MLA -20 %	0,9 %	1,0 %	1,1 %	1,2 %	1,3 %
Päästövähennys MLA -30 %	1,3 %	1,5 %	1,7 %	1,8 %	2,0 %

Asfalttimassasta aiheutuvien CO₂-päästöjen on havaittu laskevan noin puoleen kun asfalttimassan lämpötilaa lasketaan 150 °C:sta 130 °C:seen. Asfalttimassasta aiheutuvat päästöt ovat asfalttimassan valmistukseen verrattuna häviävän pieniä, mutta paikalliset vaikutukset saattavat olla merkittäviä. Esimerkiksi asfaltointityöntekijöiden työterveyden kannalta päästöjen vähentäminen on aina hyväksi, vaikka hiilidioksidi ei näissä määrin olekaan terveydelle haitallista. Kuitenkin kirjallisuusselvityksessä havaittiin, että myös muiden kuin CO₂-päästöjen määrä vähenee kun asfalttimassan lämpötila laskee, eli MLA:n levittäminen on tässä mielessä työterveyden kannalta turvallisempaa kuin KA:n.

4.3 Päästövähennysten taloudelliset kokonaisvaikutukset

AB-massojen hinta vaihtelee vuosittain, mutta keskimäärin hinta vaihtelee 40 – 50 €/t välillä. AB 22 -massan osalta hinta on vuosien 2014 ja 2015 aikana ollut keskimäärin noin 45 €/t. Helsingissä tehdyillä koekohteilla AB 22 MLA:n hinta on ollut noin 170 – 175 % tavallisen AB 22 -massan vuosien 2014 ja 2015 keskihintaan verrattuna eli noin 77 – 79 €/t. Taulukossa 11 on esitetty esimerkkilaskelmin taloudellisia kokonaisvaikutuksia eli kuinka paljon yhden hiilidioksiditonin suuruinen päästöjen laskeminen maksaa Helsingin kaupungille. Kyseessä on siis yksikköhinta, jonka avulla voidaan vertailla erilaisten toimenpiteiden hintaa suhteessa saavutettaviin päästövähennyksiin. Taloudellisten kokonaisvaikutusten suuruuteen vaikuttavat asfalttimassojen hintaero sekä niistä aiheutuvien päästöjen ero, kuten kaavassa 1 on esitetty.

$$\text{Taloudelliset kokonaisvaikutukset } \left(\frac{\text{€}}{\text{tCO}_2} \right) = \frac{\text{Hinta}_{\text{MLA}} - \text{Hinta}_{\text{KA}} \left(\frac{\text{€}}{\text{t}} \right)}{\text{Päästöt}_{\text{KA}} - \text{Päästöt}_{\text{MLA}} \left(\frac{\text{tCO}_2}{\text{t}} \right)} \quad (1)$$

Taulukko 11. MLA:n taloudellisia kokonaisvaikutuksia (yks. €/tCO₂)

Taloudelliset kokonaisvaikutukset (€/tCO ₂) (KA: 45 €/t, MLA 78 €/t)	Polttoaineen kulutus KA:n valmistuksessa				
	8 l/t	9 l/t	10 l/t	11 l/t	12 l/t
Taloudellinen kokonaisvaikutus MLA -10 %	15538	13811	12430	11300	10359
Taloudellinen kokonaisvaikutus MLA -20 %	7769	6906	6215	5650	5179
Taloudellinen kokonaisvaikutus MLA -30 %	5179	4604	4143	3767	3453

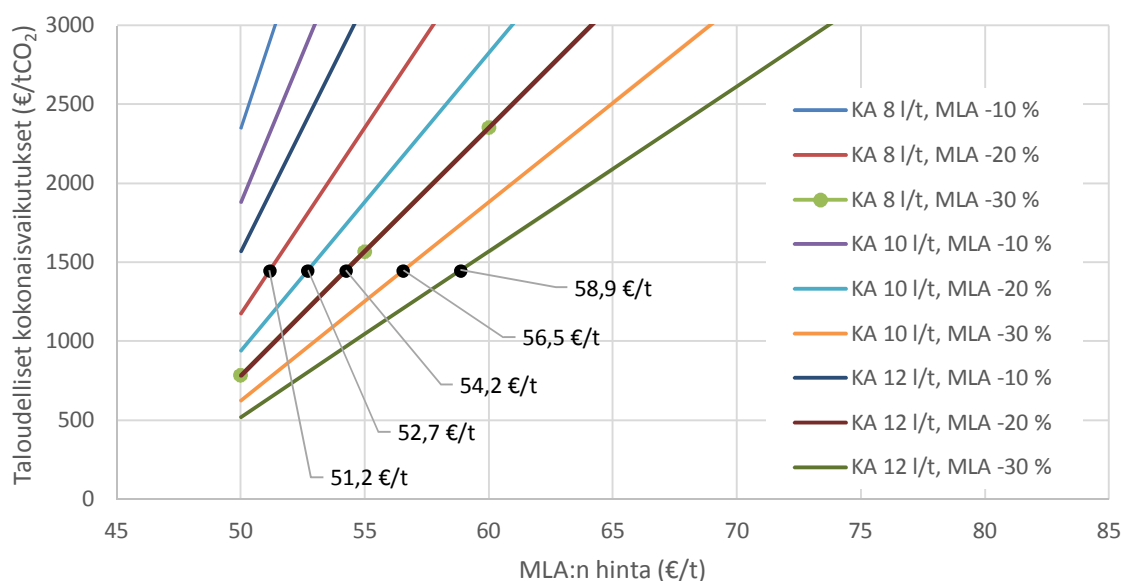
Helsingin kaupungin (2014b) ympäristöraportissa esitettyjen päästövähennysten taloudelliset kokonaisvaikutukset ovat tyypillisesti negatiivisia eli niiden avulla voidaan jopa säästää rahaa, mutta esimerkiksi ”Vähäpäästöisen teknologian kokeilut ja kehitys”-toimenpiteen kokonaisvaikutukseksi on annettu noin 1450 €/tCO₂-ekv. Vaikka KA:n valmistuksessa kuluisi polttoainetta 12 l/t ja MLA:n avulla kulutusta voitaisiin vähentää 30 %, laskennallinen kokonaisvaikutus on yli kaksikertainen ympäristöraportissa ilmoitettuun toimenpiteeseen verrattuna. Taulukossa 12 on esitetty vastaavia taloudellisia kokonaisvaikutuksia kuin taulukossa 11, mutta MLA:n hinta on sovitettu siten, että kokonaisvaikutukset lähestyvät ympäristöraportissa annettua arvoa.

Taulukko 12. MLA:n taloudellisia kokonaisvaikutuksia sovitettuina Helsingin kaupungin ympäristöraporttiin 2014 (yks. €/tCO₂)

Taloudelliset kokonaisvaikutukset (€/tCO ₂) (KA: 45 €/t, MLA 55 €/t)	Polttoaineen kulutus KA:n valmistuksessa				
	8 l/t	9 l/t	10 l/t	11 l/t	12 l/t
Taloudellinen kokonaisvaikutus MLA -10 %	4708	4185	3767	3424	3139
Taloudellinen kokonaisvaikutus MLA -20 %	2354	2093	1883	1712	1569
Taloudellinen kokonaisvaikutus MLA -30 %	1569	1395	1256	1141	1046

Taulukosta 12 nähdään, että merkittävien taloudellisten kokonaisvaikutusten saavuttamiseksi MLA:n hinnan tulisi olla huomattavasti alempi kuin koekohteilla ja lisäksi polttoaineenkulutuksen tulisi olla vähintään 20 % pienempi kuin KA:n valmistuksessa. Kuvassa 27 on esitetty MLA:n hinnan vaikutusta taloudellisiin kokonaisvaikutuksiin. Kuvan perusteella on selvää, että MLA:n hinnan on oltava nykyistä alempi, jotta taloudelliset kokonaisvaikutukset ovat edes alle 3000 €/tCO₂.

Taloudelliset kokonaisvaikutukset MLA:n hinnan funktiona
(KA: 45 €/t, vertailuarvo 1450 €/CO₂)



Kuva 27. Taloudelliset kokonaisvaikutukset MLA:n hinnan funktiona.

5 Matalalämpöasfalttikohteet Helsingissä

5.1 Yleistä kohteista

Helsingissä on tehty kolme MLA-koekohdetta, joista kaksi tehtiin vuonna 2014 Vuotielle ja yksi Kallvikintielle vuonna 2015. Kuvassa 28 on esitetty koekohteiden sijainti Vuosaaressa, joka on kaupunginosa itäisessä Helsingissä. Vuotien MLA-koekohte sisältää asfalttimassoja kahdelta eri urakoitsijalta sekä vertailuosuuden. Kallvikintien koekohteella on puolestaan yhden urakoitsijan MLA-päällyste, mutta ei vertailuosuutta. MLA-päällysteistä saatiin tietoja urakoitsijoilta melko vähän, eikä esimerkiksi yhdestäkään päällysteestä annettu CE-merkintätietoja.



Kuva 28. MLA-koekohteet Helsingissä (muokattu lähteestä Helsingin kaupunki 2016).

5.2 Vuotie

5.2.1 Kohteen esittely ja liikennemäärät

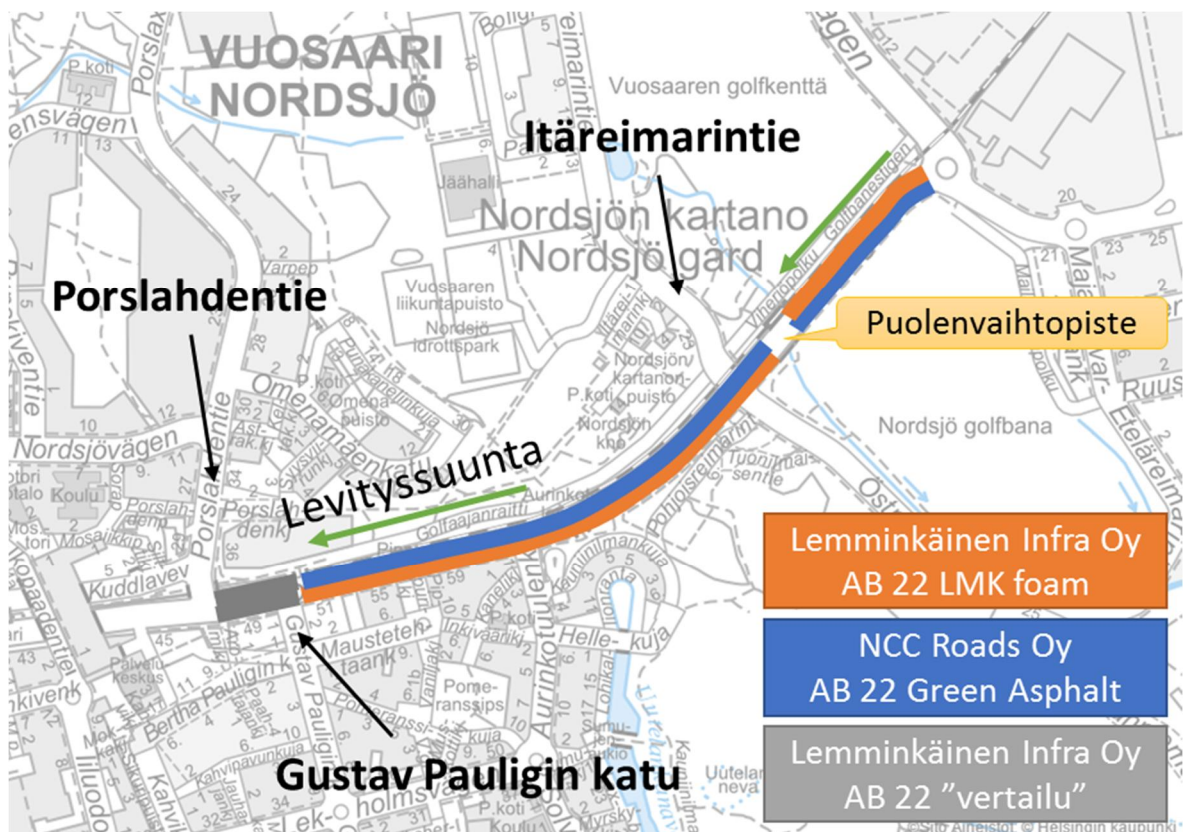
Vuotie on yksi Vuosaaren pääväylistä, joka alkaa Vuosaaren sillasta ja päättyy Vuosaaren sataman vierellä kulkevaan Satamakaareen. Vuotien MLA-koekohteet sijaitsevat noin 1100 metrin matkalla Gustav Pauligin kadun sekä Satamakaaren välissä kuten kuvassa 28 on esitetty. Koekohteen vertailuosuus sijaitsee Porslahdentien ja Gustav Pauligin kadun välillä ja se on noin 120 m pitkä.

Koekohteelle tilattiin MLA-päällysteet kahdelta eri urakoitsijalta eli NCC Roads Oy:ltä ja Lemminkäinen Infra Oy:ltä, joista jälkimmäinen toteutti myös vertailuosuuden päällystykseen tavallisella AB 22 -kuuma-asfaltilla sekä kaikki jyrsintätyöt, koska yritys toimi urakoitsijana myös alueen suurten töiden jyräasfaltointiurakassa. Myös molempien urakoitsijoiden MLA-päällysteet tehtiin AB 22 -massalla, mutta NCC Roads Oy:n MLA-massaa myydään kaupallisella nimellä Green Asphalt ja puolestaan Lemminkäinen Infra Oy:n MLA-massan yhteydessä käytetään nimeä LMK foam.

Vertailumassa valmistettiin Tuusulassa Sammonmäen asfalttiasemalla, josta matkaa kohteelle oli noin 24 km. Vertailumassan kiviaines oli peräisin Puolivälimäeltä Mäntsälästä ja kiviaineksen nastarengaskulutuskestävyyden luokka oli A_N10, eikä asfalttimassassa käytetty

asfalttirouhetta. Green Asphalt -asfalttimassassa ei myöskään käytetty asfalttirouhetta, mutta sen kiviaineksen luokka oli A_N7. LMK foam -massasta ei saatu tietoja urakoitsijalta. Kaikki päällysteet tilattiin niin kutsutusti tonnityönä eli levitettävän kerroksen paksuus oli noin 100 – 120 kg/m². Kohteen päällysteiden pohjatoina tehtiin laatikkojyrsintä sekä liimaus.

Koekohteen päällystämisen aloitti Lemminkäinen Infra Oy noin seitsemän aikaan tiistai-aamuna 16.9.2014, jolloin ilman lämpötila oli vain noin 5 °C, mutta lämpötila nousi kuitenkin nopeasti aurinkoisen sään ansiosta. Asfalttimassa valmistettiin urakoitsijan asfalttiasemalla Lohjalla, josta kohteelle oli matkaa noin 67 km. Urakoitsija aloitti päällystykseen Satamakaaren päädyssä länteen kulkevalla kaistalla, mutta niin kutsutussa puolenvaihtopisteessä urakoitsija siirtyi levittämään päällystettä itään kulkevalle kaistalle ja jatkoi sitä pitkin koekohteen loppuun. Puolenvaihtopiste sijaitsee Itäreimarintien läheisyydessä lyhyen sillan kohdalla. NCC Roads Oy aloitti päällystystyön vastaavaan aikaan saman viikon perjantai-aamuna 19.9.2014. Aamun sekä päivän sääolot olivat hyvin vastaavat kuin tiistaina eli lämpötila oli melko alhainen aamulla, mutta ilma lämpeni nopeasti. Asfalttimassa tuotiin Vantaalta urakoitsijan asfalttiasemalta, josta etäisyys kohteelle oli noin 21 km. Myös NCC Roads Oy aloitti päällystystyön Satamakaaren päädyssä, mutta ensin levitettiin itään kulkevalla kaistalla ja puolenvaihtopisteen jälkeen länteen kulkevalla kaistalla. Kuvassa 29 on esitetty urakoitsijoiden osuudet koekohteen päällystystöistä sekä puolenvaihtopiste.



Kuva 29. Vuotien MLA-koekohteen urakoitsijoiden levityskaistat sekä puolenvaihtopiste (muokattu lähteestä Helsingin kaupunki 2016).

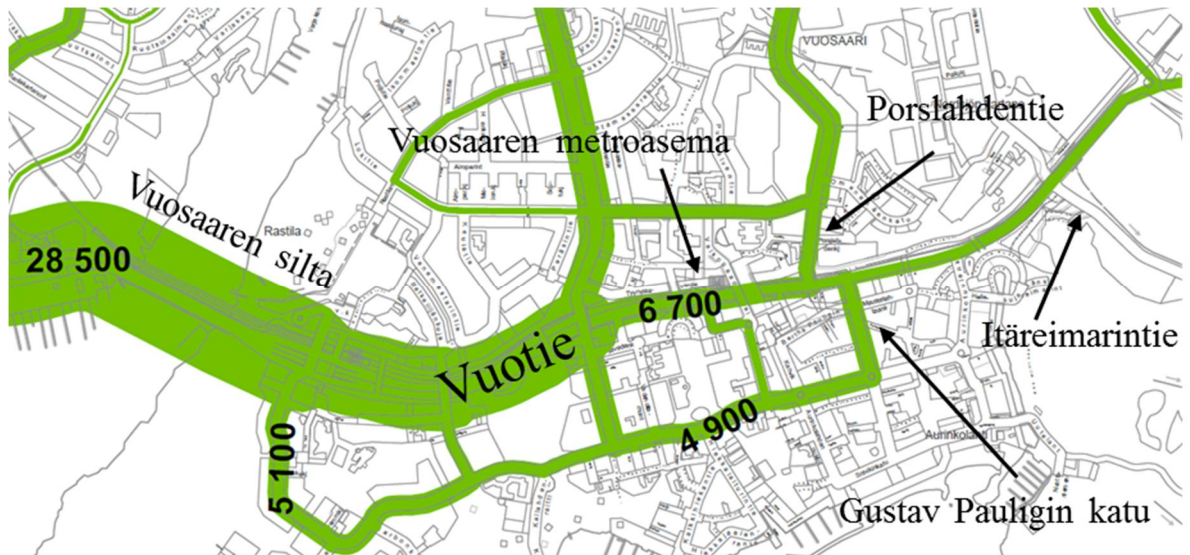
MLA-koekohteilla kumpaankin suuntaan kulkee vain yksi kaista, mutta liittymien yhteydessä kääntyvälle liikenteelle on erilliset kaistat, joille ei kohdistettu tutkimuksia. Vertailu-

osuudella kulkee kaksi kaistaa molempiin suuntiin, mutta tutkimukset kohdistettiin vain yhdelle kaistalle kumpaankin suuntaan. Kuvassa 30 on esitetty vertailuosuuden tutkittavat kaistat, tutkimuspisteet V1 – V6 sekä perustelut kaistojen valinnalle.

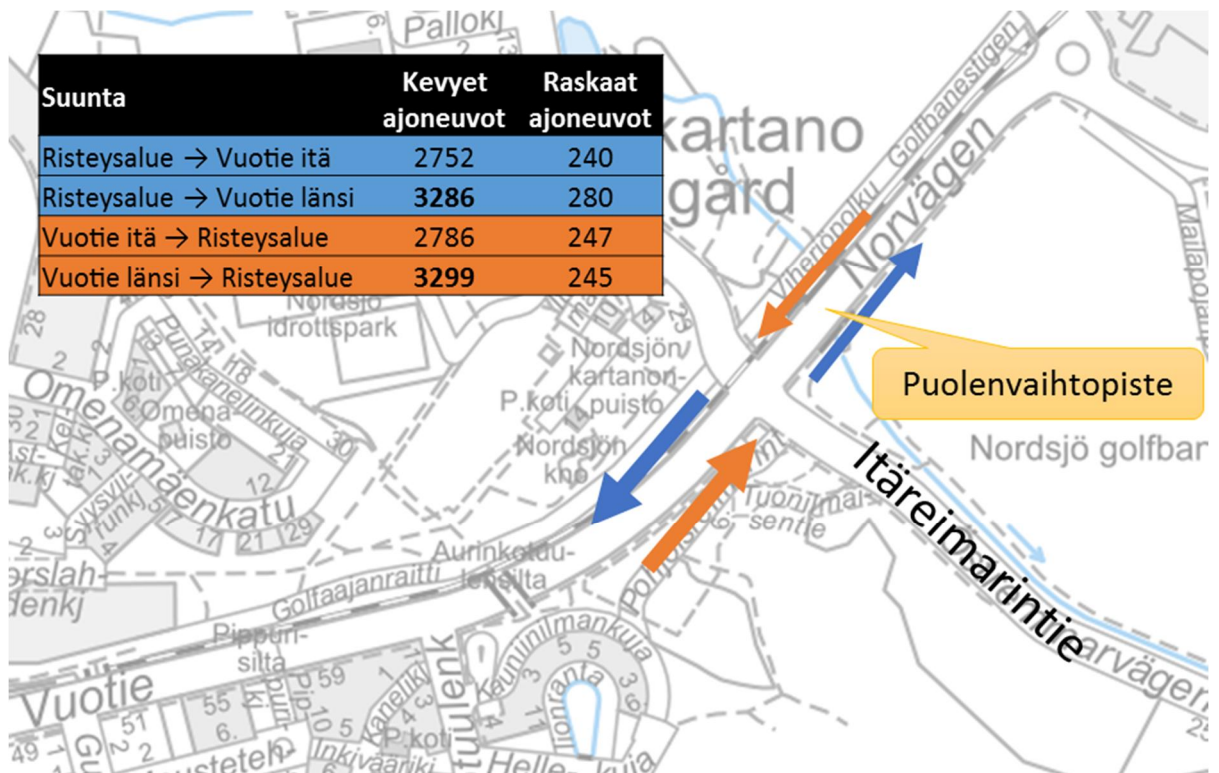


Kuva 30. Vertailuosuuden tutkittavat kaistat ja tutkimuspisteet (kartta muokattu lähteestä Helsingin kaupunki 2016).

Kuvassa 31 on esitetty liikennemääriä Vuotiellä ja siitä nähdään miten liikennemäärä vähenee Vuotiellä itään siirryttäessä. Kuvassa esitetyt liikennemäärät ovat keskimääräisiä arki-vuorokausiliikennemääriä syyskuulta 2014, jotka ovat noin 6 % suurempia kuin liikennemäärät keskimäärin koko vuoden ajanjaksolla. (Helsingin kaupunki 2014c). Liikennemäärä ennen Vuosaaren siltaa on jopa 28500 ajon., mutta Vuosaaren metroaseman läheisyydessä vastaava luku on enää 6700 ajon. Lisäksi Vuotiellä tehtiin 24.9.2015 liikennemäärälaskenta Itäreimarintien liittymässä. Liikennemäärälaskennan keskiarkivuorokausiliikenteen (KAVL) tulokset ovat esitetty kuvassa 32, josta nähdään, että Vuotien ja Itäreimarintien liittymän länsipuolella Vuotien KAVL on yhteensä noin 3550 ajon. ja puolestaan liittymän itäpuolella KAVL on yhteensä noin 3000 ajon. Raskaan liikenteen osuus on lähes vastaava kaikissa suunnissa, mutta liittymästä länteen kulkevalla kaistalla raskaan liikenteen määrä on hieman muita suuntia suurempi.



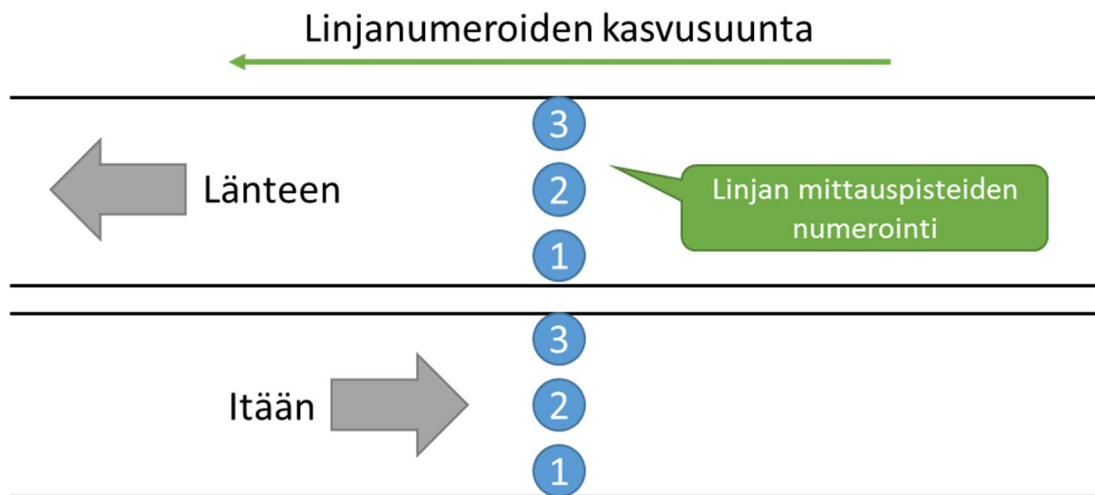
Kuva 31. Liikennemäärä Vuotiellä (muokattu lähteestä Helsingin kaupunki 2014c).



Kuva 32. Liikennemäärälaskennan tulokset (KAVL) (muokattu lähteistä Helsingin kaupunki 2015b, Helsingin kaupunki 2016).

5.2.2 Levityslämpötilamittaukset

Levitystöiden yhteydessä mitattiin levityslämpötiloja FLIR-lämpökameralla. Levityslämpötiloja mitattiin linjoittain eli tien poikkisuunnassa siten, että jokaisesta linjasta kirjattiin ylös kolme lämpötilalukemaa kuvan 33 mukaisesti. Lämpötilalukemat 1 ja 3 mitattiin noin 40 – 50 cm levitetävän päällysteen reunoista ja lukema 2 päällysteen keskeltä.



Kuva 33. Vuotien levityslämpötilamittausten numerointi.

Mittauslinjoja pyrittiin ottamaan tasaisin välimatkoin tai kun havaittiin merkittäviä poikkeamia levityslämpötilassa. Mittaustulokset ja linjakartta on esitetty liitteessä 3. Taulukkoon 13 on koottu mitattujen levityslämpötilojen minimi, maksimi sekä keskiarvot. Arvot ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, sillä levityslämpötilojen mittausta ei toteutettu systemaattisesti vaan arvioitujen välimatkojen tai havaittujen poikkeamien perusteella.

Taulukko 13. Vuotiellä mitattujen levityslämpötilojen minimi, maksimi ja keskiarvot.

Urakoitsija	$T_{\min.} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\max.} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{ka.}} (^{\circ}\text{C})$
Lemminkäinen Infra Oy	95	153	127
NCC Roads Oy	95	165	125

5.2.3 Uraprofiilimittaukset ja tulosten tulkinta

Vuotien nastarengasurautumista tutkitaan uraprofiilimittausten avulla. Mittaukset aloitettiin 29.10.2014 eli noin kuusi viikkoa levitystöiden valmistuttua ja niitä jatketaan puolivuositain kolmen vuoden ajan. Seuraavat mittaukset toteutettiin 20.5.2015 (kevät 2015), 28.10.2015 (syksy 2015) sekä 11.5.2016 (kevät 2016) ja mittauksia jatketaan vielä syksyllä 2016 sekä keväällä 2017.

Uraprofiilit mitattiin sähkömekaanisella profilometrillä, joka on esitetty kuvassa 34. Profilometrin toiminta perustuu korkeusanturiin sekä mittarenkaaseen liitettyyn kulma-anturiin, jonka avulla mitataan etäisyys. Mittauksen alussa etäisyyslukema nollataan ja mittausyksikköä ryhdytään siirtämään kaistan yllä kulkevaa kiskoa pitkin. Mittarengas kulkee kaistan poikkiprofiilia pitkin ja etäisyysanturi mittaa mittarenkaan korkeustason sekä kulma-anturi kuljetun matkan. Laite kerää tietoja yhden senttimetrin välein ja sen mitaamat arvot kerätään talteen tietokoneella, joka kirjoittaa arvot tulostiedostoon.



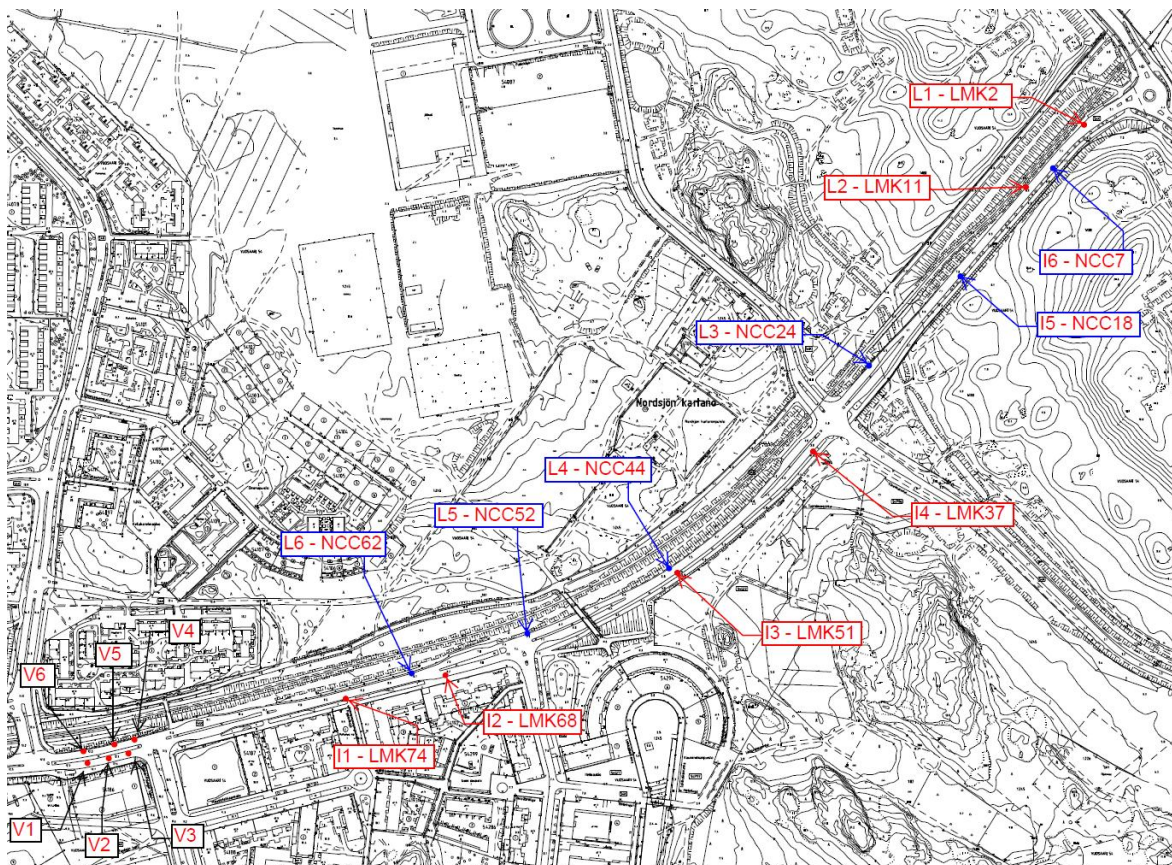
Kuva 34. Sähkömekaaninen profilometri profililla V4 länteen.

Uraprofiilimittauslinjoja on yhteensä 18, joista kuusi on vertailuosuudella, kuusi NCC Roads Oy:n Green Asphalt -päällysteellä ja loput kuusi Lemminkäinen Infra Oy:n LMK foam -päällysteellä. Profiililinjat pyrittiin valitsemaan tasaisin välimatkoin ja levityslämpötilojen kannalta mielenkiintoisista paikoista. Taulukossa 14 on esitetty MLA-koekohteiden profiilien nimet sekä niitä vastaavat levityslämpötilamittauslinjat ja -tulokset kuvan 33 mukaisissa pisteissä. Vertailuosuuden profiilit nimettiin etuliitteellä ”V” sekä numerolla, joista 1-3 on itään kulkevalla kaistalla ja 4-6 länteen kulkevalla kaistalla. Kuvassa 35 on esitetty uraprofiilimittauksen sijainnit Vuotiellä. Profiilien sijainnit merkittiin päällysteisiin asfalttinauloilla, joista mitattiin lisäksi tarkat GPS-koordinaatit.

Taulukko 14. Uraprofiilien nimet sekä profiileja vastaavat levityslämpötilamittauslinjat ja -pisteet.

Profiili	Urakoitsija	Linja	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)
L1	Lemminkäinen Infra Oy	2	119	115	130
L2	Lemminkäinen Infra Oy	11	106	105	118
I4	Lemminkäinen Infra Oy	37	130	130	118
I3	Lemminkäinen Infra Oy	51	130	123	105
I2	Lemminkäinen Infra Oy	68	130	130	110
I1	Lemminkäinen Infra Oy	74	127	110	105
I6	NCC Roads Oy	7	130	115	130
I5	NCC Roads Oy	18	127	125	105
L3	NCC Roads Oy	24	105	100	103
L4	NCC Roads Oy	44	105	97	129
L5	NCC Roads Oy	52	130	117	130
L6	NCC Roads Oy	62	130	147	145

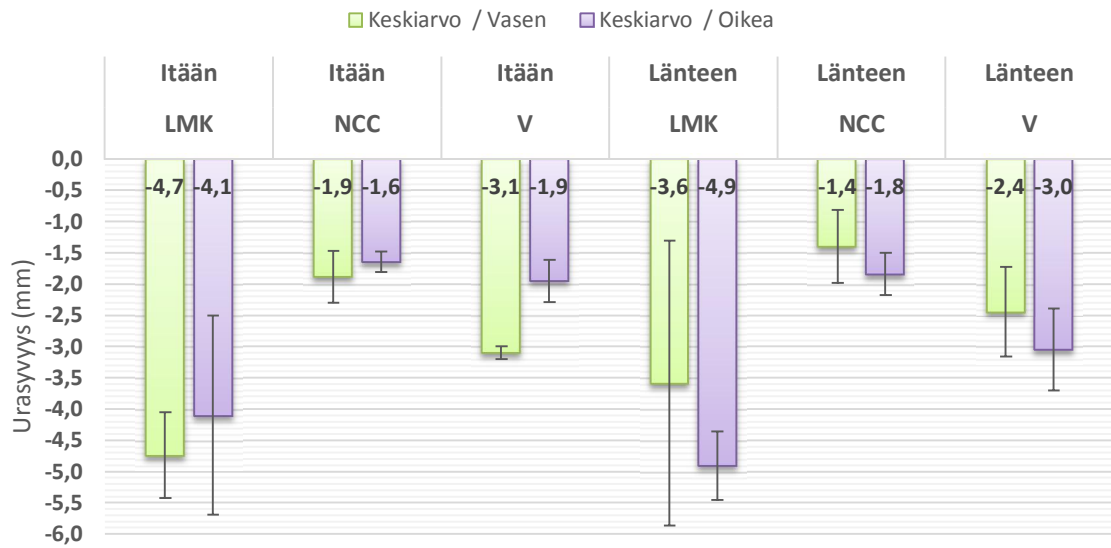
L = Länteen, I = Itään



Kuva 35. Vuotien uraprofilimittausten sijainnit.

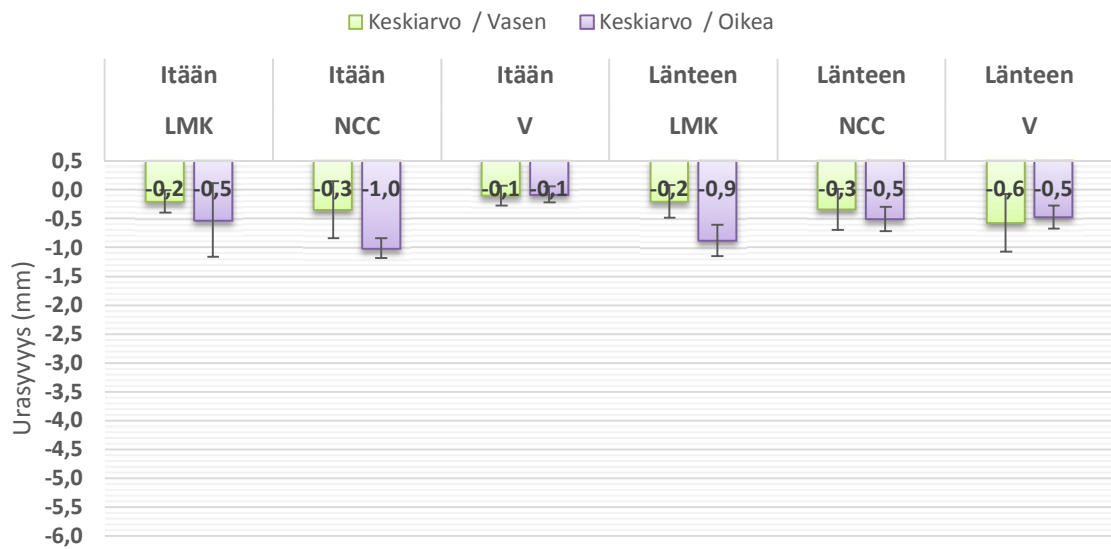
Kuvissa 36 ja 38 on esitetty urasyvyyksien keskimääräisiä muutoksia kahden talven ja kuvassa 37 yhden kesän aikana eri päällysteillä ja eri suuntiin kulkevilla kaistoilla. Kuviin on merkitty myös muutosten keskihajonnat. Uraprofilimittaustulosten tulkintamalli sekä profiilikuvaajat on esitetty tarkemmin liitteessä 5.

Vuotien urasyvyyden muutos: 1. talvi



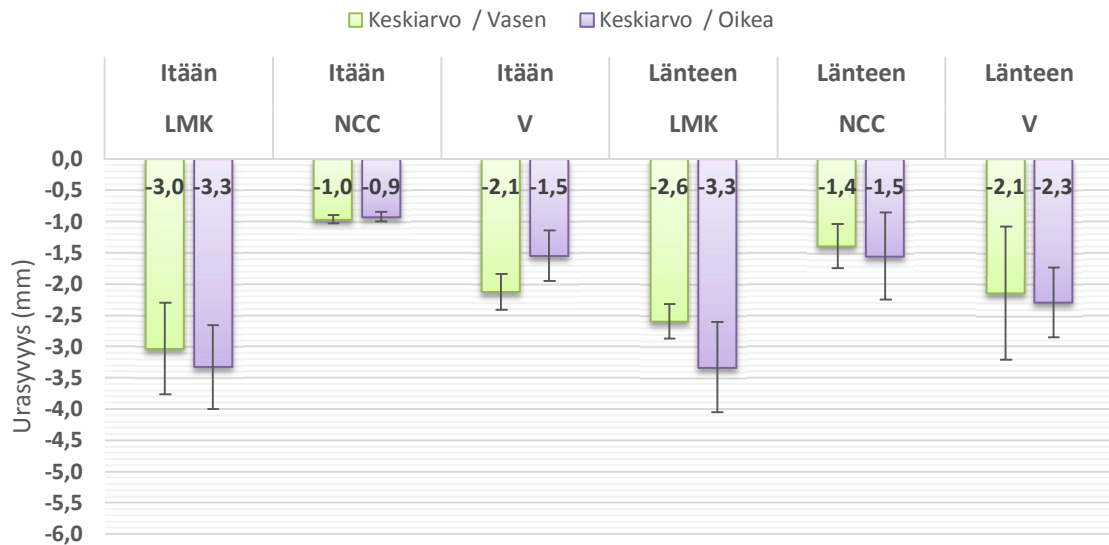
Kuva 36. Vuotien urasyvyyden muutos ensimmäisen talven aikana 2014 – 2015.

Vuotien urasyvyyden muutos: 1. kesä



Kuva 37. Vuotien urasyvyyden muutos ensimmäisen kesän aikana 2015.

Vuotien urasyvyyden muutos: 2. talvi



Kuva 38. Vuotien urasyvyyden muutos toisen talven aikana 2015 - 2016.

Kuvista nähdään, että talvien aikana urien kasvu on ollut huomattavasti nopeampaa kuin kesällä nastarengaskulutuksen takia. Talvien urasyvyyksien muutoksista nähdään selvästi, että NCC Roads Oy:n Green Asphalt -päällysteen urasyvyyksien kasvu on selvästi Lemmin-käinen Infra Oy:n vertailu- ja LMK foam -päällysteitä hitaampaa, mikä on pääosin kovemman kivimateriaalin ansiota. LMK foam -päällysteen urasyvyyden kasvu on ollut nopeinta verrattuna muihin päällysteisiin, mikä voi viitata esimerkiksi eri kiviainekseen vertailu- ja LMK foam -massan välillä.

Kesän 2015 aikana urasyvyyksien muutokset olivat melko vähäisiä, minkä takia myös urasyvyyksien tulkinnassa oli hieman ongelmia, kuten liitteessä 5 on esitetty. Kuitenkin kuvasta 37 nähdään, että urasyvyydet olivat kasvaneet myös kesän aikana pääosin deformaation takia. Kuvan perusteella vaikuttaisi siltä, että MLA-päällysteillä keskimääräinen deformaatiouran syvyys on ollut suurempi kuin vertailupäällysteellä, mutta tulos ei ole täysin selvä, koska vertailuosuudella länteen kulkevalla kaistalla deformaatiouran syvyys on ollut keskimäärin jopa 0,6 mm. MLA-päällysteiden suurempaa deformaatiota voisi selittää päällysteiden vertailumassaa pienempi jäykkyys sideaineen vähäisemmän vanhenemisen takia. Urasyvyyksien ja mitattujen levityslämpötilojen välillä ei havaittu yhteyttä, sillä päällysteen kiviaineksella on merkittävin vaikutus urautumiseen. Toisaalta levityslämpötilan vaikutus olisi voinut näkyä deformaationa edellä mainitusta syystä, mutta myöskään ensimmäisen kesän urasyvyyksien muutoksien ja levityslämpötilojen välillä ei ollut yhteyttä.

Kuten liitteestä 5 käy ilmi, lähes kaikkien kaistojen poikkiprofilit olivat keskeltä kaistan reunoja alempana, mikä myös tarkistettiin oikolaudan avulla keväällä 2016. Profiliien erikoiseen muotoon voi olla useitakin syitä, kuten esimerkiksi levittimen perän virheasento tai tiivistystyön epätasainen jakautuminen. Kuitenkin sama ilmiö toistui myös molemmilla urakoitsijoilla, mikä vähentää levitys- ja tiivistystyön virheiden todennäköisyyttä. Toinen urakoitsijoista teki kuitenkin kaikki kohteen jyrätyöt, mikä voisi selittää profiilien muotoa. Kuvissa 39 ja 40 on esitetty jyrätyt pintoja Vuotiellä ennen MLA-päällysteiden levitystä. Vanhan päällysteen jyrätyksen yhteydessä pohja on saattanut jäädä osittain epätasaiseksi.

etenkin kaistojen reunoilla, mikä on voinut aiheuttaa poikkiprofiilin erikoisen muodon, kun asfalttimassaa on levitetty vakiopaksuisena.



Kuva 39. Epätasaisuuksia jyrsityllä pinnalla Vuotiellä Aurinkotuulenkadun liittymästä itään.



Kuva 40. Epätasaisuuksia jyrsityllä pinnalla Vuotiellä Aurinkotuulenkadun liittymän läheisyydessä.

5.2.4 Laboratoriokokeet ja tulosten tulkinta

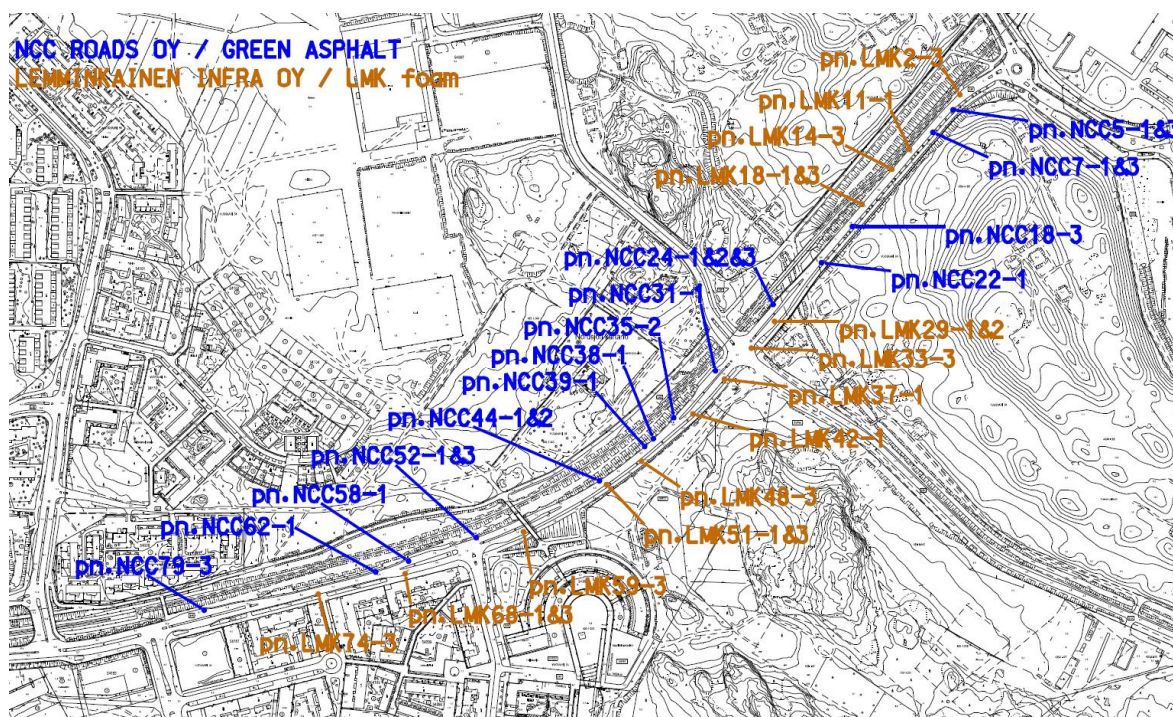
Vuotien MLA-koekohteiden ja vertailuosuuden päällysteistä otettiin poranäytteitä, joille tehtiin laboratoriokokeita taulukon 15 mukaisesti.

Taulukko 15. Vuotien laboratoriotutkimukset asfalttimassoittain.

Tutkimus	Sovellettava standardi	NCC	LMK	V
Kappaletiheys	SFS-EN 12697-6A	20 kpl	17 kpl	12 kpl
Maksimitiheys	SFS-EN 12697-5B	20 kpl	17 kpl	12 kpl
Tyhjätila	SFS-EN 12697-8	20 kpl	17 kpl	12 kpl
Nastarengaskuluminen (Prall)	SFS-EN 12697-16A	5 kpl	5 kpl	5 kpl
Jaksollinen virumiskoe (Creep)	SFS-EN 12697-25	3 kpl	3 kpl	

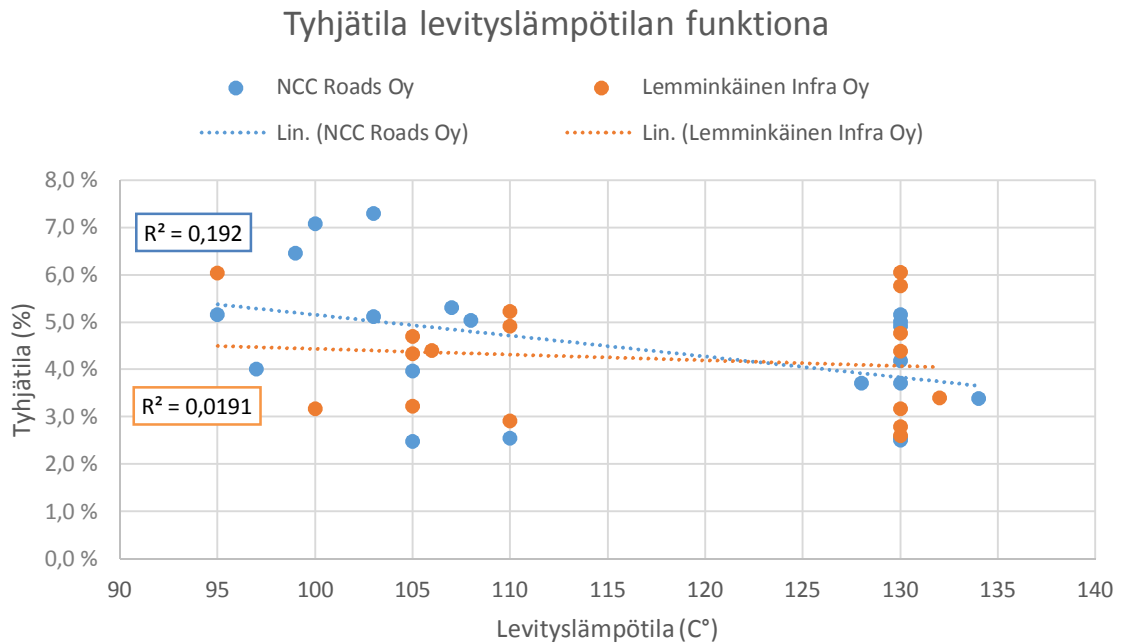
NCC = NCC Roads Oy (Green Asphalt), LMK = Lemminkäinen Infra Oy (LMK foam), V = Vertailuosio

Kuvassa 41 on esitetty Vuotien tyhjätilatutkimuksissa käytettyjen poranäytteiden sijainnit sekä niitä vastaavat levityslämpötilamittauslinjat ja -pisteet.



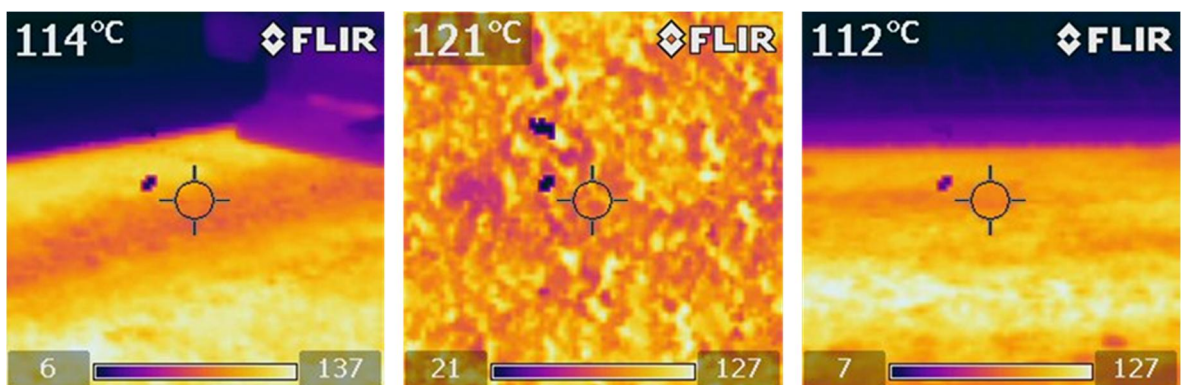
Kuva 41. Vuotien tyhjätilatutkimusten poranäytteiden sijainnit, pn. = poranäyte.

MLA-päällysteiden tyhjätilatutkimuksissa poranäytteiden otto kohdennettiin levityslämpötilamittausten perusteella. Tavoitteena oli ottaa molemmilta päällysteiltä poranäytteitä kahdelta levityslämpötilaväliltä eli niin kutsutuilta normaalilta sekä kylmältä levityslämpötilaväliltä. Normaalina lämpötilavälinä käytettiin 128 – 134 °C ja puolestaan kylmänä lämpötilavälinä 95 – 110 °C. Tarkoituksena oli selvittää miten päällysteen levityslämpötila korreloi tyhjätilan kanssa. Tutkimustulokset on esitetty tarkemmin liitteessä 4 ja kuvassa 42 on esitetty tyhjätilatutkimusten tulokset levityslämpötilan funktiona.



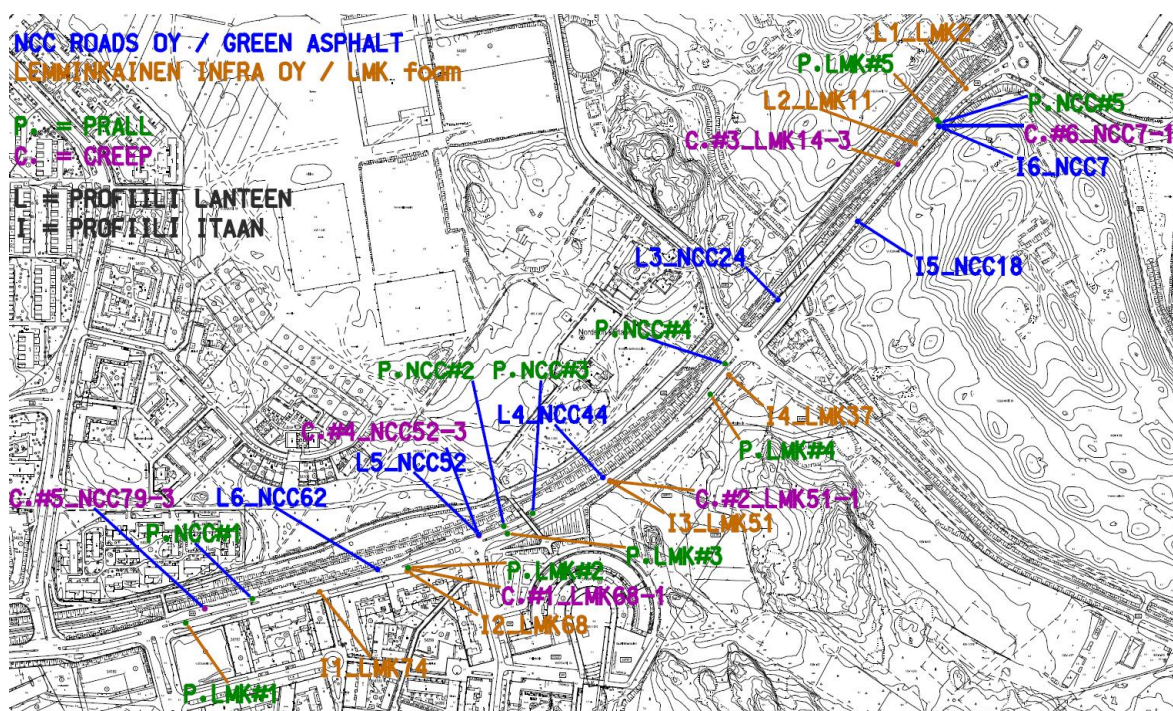
Kuva 42. Vuotien MLA-koekohteiden tyhjätila levityslämpötilan funktiona.

Tyhjätilan ja levityslämpötilan välille saatiin pienet korrelaatiokertoimet, vaikka niiden välinen yhteys on itsestään selvä. Suurimpina ongelmina tutkimuksissa olivat kuitenkin virheet levityslämpötilojen mittauksissa sekä poranäytteenoton kohdistaminen oikeaan paikkaan. Päälystelaatan lämpötilan havaittiin vaihtelevan melko paljon pienelläkin alueella, eikä mitattua pistettä voitu merkitä pysyvästi päälysteeseen. Kuvassa 43 on esitetty kuvankaappauksia lämpökameran ruudusta. Lisäksi päälysteen tiivistymisen kannalta olennaisia ovat laatan esijyräys sekä asfalttimassan lämpötila sen aikana. Laatan lämpötiloja ei ollut mahdollista määrittää jatkuvasti juuri ennen esijyräystä, sillä jyrän ollessa liikkeellä mittauksen turvallisuutta ei voitu taata.



Kuva 43. Kuvankaappauksia lämpökameran ruudusta.

Kuvassa 44 on esitetty Vuotien MLA-koekohteiden uraprofiililinjojen sijainnit sekä sijainnit kaikille poranäytteille, joista tutkittiin asfalttipäälysteiden laatua ja ominaisuuksia urautumiskestävyydelle, joita ovat nastarengaskuluma (Prall) ja deformaatiokestävyys (Viruma eli Creep).



Kuva 44. Tutkimuspisteitä Vuotiellä, P = PRALL, C = CREEP, L = Profiili länteen, I = Profiili itään

MLA-koekohteiden päällysteiden nastarengaskulutuskestävyyttä verrattiin perinteiseen kuuma-asfalttiin Prall-kokeiden avulla. Koekohteelta otetut poranäytteet sahattiin kaksiteräsahalla 30 mm korkeiksi koestuksia varten. Nastarengaskulutuskokeet tehtiin Aalto-yliopistossa standardin SFS-EN 12697-16A mukaisesti eli näytteiden ja veden lämpötila oli 5 °C, veden pumppausnopeus oli 2,0 l/min sekä laitteen kierrosnopeus 950 rpm. Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Vuotien poranäytteiden nastarengaskulutuskokeen (Prall) tuloksia.

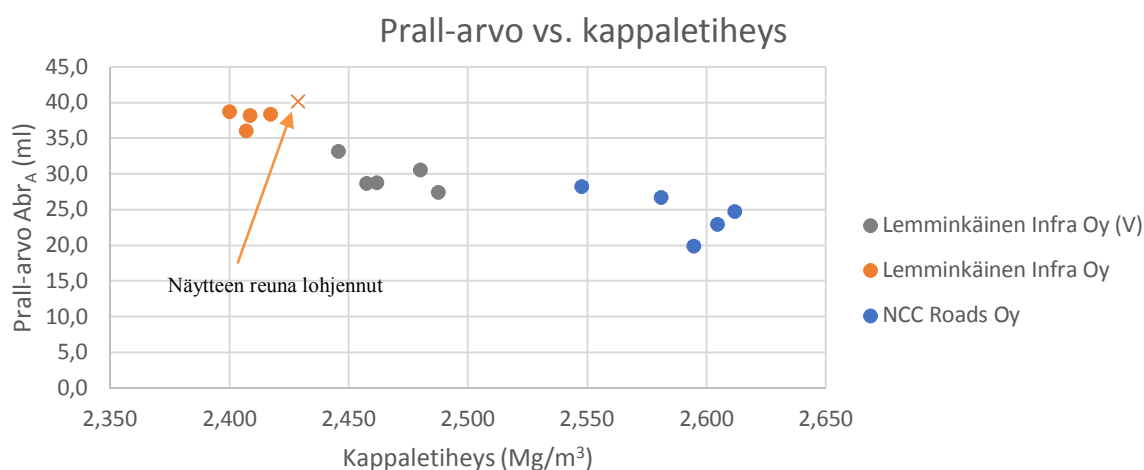
Urakoitsija	Näyte	ρ_{kappale} (g/cm ³)	Prall-arvo A_{BrA} (ml)	Keskiarvo A_{BrA} (ml)
Lemminkäinen Infra Oy	V1	2,446	33,2	29,8 (II*)
Lemminkäinen Infra Oy	V2	2,462	28,8	
Lemminkäinen Infra Oy	V3	2,458	28,8	
Lemminkäinen Infra Oy	V4	2,480	30,6	
Lemminkäinen Infra Oy	V5	2,488	27,5	
Lemminkäinen Infra Oy	1	2,429	40,2**	37,9 (III*)
Lemminkäinen Infra Oy	2	2,400	38,8	
Lemminkäinen Infra Oy	3	2,407	36,1	
Lemminkäinen Infra Oy	4	2,409	38,3	
Lemminkäinen Infra Oy	5	2,417	38,5	
NCC Roads Oy	1	2,548	28,3	24,6 (II*)
NCC Roads Oy	2	2,605	23,0	
NCC Roads Oy	3	2,595	19,9	
NCC Roads Oy	4	2,612	24,8	
NCC Roads Oy	5	2,581	26,7	

*Asfalttinormien 2011 mukainen kulumisluokka (PANK ry 2011)

**näytteen reuna lohjennut, ei mukana keskiarvossa

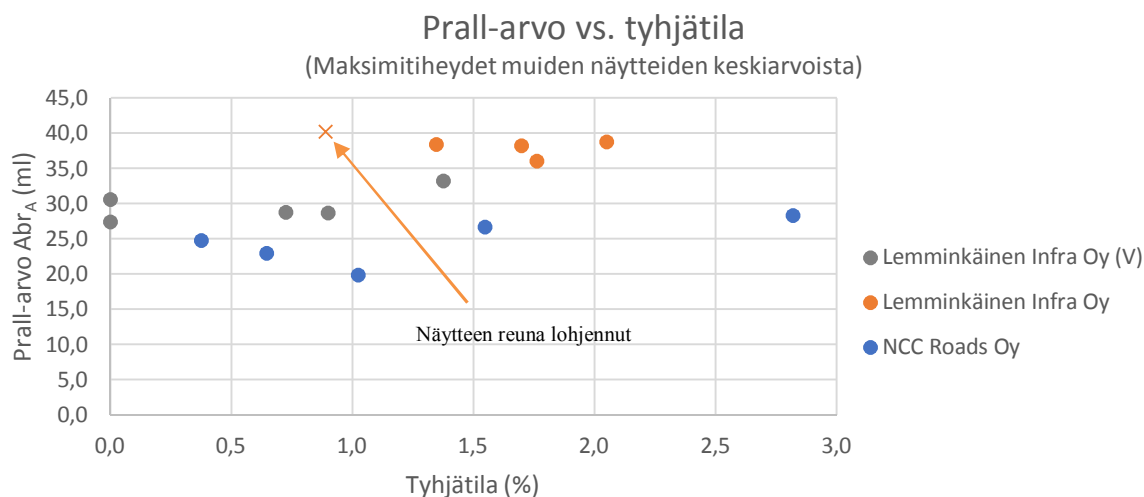
Kiviainesten ilmoitetut luokat vastaavat hyvin Prall-kokeiden tuloksia, sillä NCC Roads Oy:n MLA-päällysteestä (A_N7) otettujen näytteiden Prall-arvot olivat huomattavasti parempia kuin Lemminkäinen Infra Oy:n KA:sta (A_N10) otettujen näytteiden Prall-arvot. Lemminkäinen Infra Oy:n MLA:n ja KA:n väliset erot voivat johtua päällysteiden tyhjätilaeroista tai eri kiviaineksesta, vaikka niiden nastarengaskulutuskestävyyden luokka olisikin sama.

Kuvassa 45 on esitetty Prall-kokeiden tuloksia verrattuina näytteiden kappaleitiheyksiin. Kuvan perusteella on selvää, että kappaleitiheys vaikuttaa Prall-arvoon. Tämän taustalla on jälleen asfalttimassassa käytetty kiviaines, sillä tiheämpi kiviaines voidaan yleistetysti olettaa kestävämmäksi. Kuvasta nähdään myös, että Lemminkäinen Infra Oy:n asfalttimassoissa käytetyt kiviainekset eivät mitä luultavammin ole samoja, mitä tukevat myös asfalttiasemien sijainnit, sillä MLA-massa valmistettiin Lohjalla ja vertailumassa puolestaan Tuusulassa. MLA:n ja vertailumassan eri kiviainesten takia asfalttimassat eivät ole kovin vertailukelpoisia. Tarkoituksena oli selvittää valmistusprosessien vaikutuksia, eikä kiviaineksen.



Kuva 45. Prall-arvo vs. kappaleitiheys

Kuvassa 46 on esitetty Prall-kokeiden tuloksia verrattuina näytteiden tyhjätiloihin, jotka laskettiin muiden näytteiden maksimitiheyksien keskiarvojen perusteella. Tästä syystä tyhjätilat ovat vain likiarvoja. Kuvasta nähdään kuitenkin, että tyhjätilalla ei ole yhtä suurta vaikutusta Prall-arvoon kuin kiviaineksella.



Kuva 46. Prall-arvo vs. tyhjättila

Prall-kokeiden tulokset tukevat myös selvästi uraprofiilimittausten tuloksia, sillä LMK foam-päällysteen urasyvytydet olivat keskimäärin suurimpia ja Green Asphalt -päällysteen urasyvytydet puolestaan pienimpiä.

Vuotielä otettiin myös halkaisijaltaan 150 mm poranäytteitä MLA-päällysteistä jaksollisia virumiskokeita varten. Standardin SFS-EN 12697-25 mukaan näytteiden korkeuden tulee olla 60 mm, mutta levitetyn laatan paksuus ei ollut näin suuri. Tästä syystä näytteiden alapuolista asfalttikerrosta jätettiin noin 15 mm mukaan näytteisiin sahauksen yhteydessä, mikä toisaalta vastaa myös todellista tilannetta kohteella. Standardi edellyttää myös, että rinnakkaiskappaleita otetaan viisi, mutta tässä tutkimuksessa kappaleita oli vain kolme kummastakin päällysteestä. Varsinaiset koestukset toteutettiin Aalto-yliopistossa ja testilämpötilana oli 40 °C. Käytetty paine oli 100 kPa ja kuormituskertoja 3600. Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 17. Näytteiden maksimitiheyksiä ei määritetty, eikä tyhjättilaa voida laskea muiden näytteiden maksimitiheyksien perusteella, koska näytteissä oli alapuolista asfalttikerrosta mukana.

Taulukko 17. Vuotien poranäytteiden jaksollisten virumiskokeiden (Creep) tuloksia.

Urakoitsija	Näyte	ρ_{kappale} (Mg/m ³)	ϵ_n (%)
Lemminkäinen Infra Oy	1	2,348	1,7
Lemminkäinen Infra Oy	2	2,325	2,2
Lemminkäinen Infra Oy	3	2,383	2,2
NCC Roads Oy	4	2,466	2,3
NCC Roads Oy	5	2,506	3,2*
NCC Roads Oy	6	2,492	-**

*muodonmuutoskäyrä ei ollut jatkuva, vaan siinä oli portaita

**Sähkökatkos, ei tulosta

Koestettavien näytteiden määrä oli standardista poikkeava ja lisäksi kahden NCC Roads Oy:n päällysteestä poratun näytteen koestus epäonnistui, minkä takia tulosten perusteella ei

Uraprofiilimittausten kesän 2015 keskimääräisten tulosten perusteella MLA-päällysteiden deformaatiokestävyydet olivat melko vastaavia, mikä tukee Creep-kokeiden tuloksia onnistuneiden näytteidensä osalta. Useimmat näytteet olivat Asfalttinormien 2011 mukaan deformaatioluokkaa II.

5.3.1 Kohteen esittely ja liikennemäärät

Kallvikintien MLA-koekohde sijaitsee tien eteläpäässä Vuotien läheisyydessä. Koekohde alkaa Vuotien yli kulkevan sillan jälkeen ja päättyy Vuosaarentien liittymään ja sen yhteispituus on noin 400 m. Osa kohteesta, noin 70 m, sijaitsee kuitenkin Tyynylaavantiellä, joka on Kallvikintien poikkikatu. Vaikka koekohde on melko lyhyt, sen pinta-ala on yhteensä 5250 m². Suurta pinta-alaa selittävät kääntyvälle liikenteelle erilliset kaistat sekä pysäköintipaikat tien laidassa. Kuvassa 47 on esitetty kohteen sijainti kartalla.



Kuva 47. Kallvikintien MLA-koekohde (muokattu lähteestä Helsingin kaupunki 2016).

Koekohteen AB 22 MLA -päälyste tilattiin Asfalttikallio Oy:ltä ja kyseessä oli yrityksen MLA-pilottikohde. Varsinaista kaupallista nimeä MLA-päälysteelle ei toistaiseksi ole annettu. Kohteelle tehtiin laatikkojyrsintä ja tonnityönä tehty MLA-päälyste liimattiin jyrityyn pintaan. Asfalttimassa valmistettiin Senkkerin asfalttiasemalla Tuusulassa, josta oli noin 27 km:n matka kohteelle. Asfalttimassan suunnittelutietojen mukaan siinä oli kuitenkin käytetty 30 % asfalttirouhetta, mikä oli hieman epätavallista, sillä Staran asfaltointiurakoissa AB 22 -massat valmistetaan tyypillisesti ilman asfalttirouhetta. Päälystystyö tehtiin torstaina 24.9.2015, jolloin ilman lämpötila vaihteli noin 10 – 15 °C:n välillä. Päivän aikana satoi hieman vettä ja iltapäivällä sade ylti jatkuvaksi, mutta työt saatiin tehtyä loppuun. Päälystystyö aloitettiin Tyynylaavantieltä, minkä jälkeen päälystettiin Kallvikintien pohjoiseen kulkevan kaistan alkupääty Tyynylaavantiehen saakka. Päälysteen jäähdyttyä työtä jatkettiin toiselta kaistalta Tyynylaavantieltä, josta siirryttiin jälleen Kallvikintielle pohjoiseen kulkevalle kaistalle. Tämän jälkeen päälystettiin etelään kulkeva kaista.

5.3.2 Levityslämpötilamittaukset

Kallvikintiellä tehtiin myös levityslämpötilamittauksia FLIR-lämpökameralla. Lämpötilamittaukset tehtiin samantapaisesti kuin Vuotiellä, mutta mittaustapaa tarkennettiin hieman. Jokaisesta linjasta mittattiin kolme levityslämpötilaa levittimen jälkeen, mutta ennen mitausta pyrittiin varmistamaan, että myös jyvä oli saapumassa mitattavalle linjalle. Kohteella mitattiin siis levityslämpötiloja, mutta voidaan olettaa, että myös päälysteen esijyväys on tapahtunut lähes vastaavassa lämpötilassa. Mittauksissa käytettiin apuna puusta rakennettua mittavartta, jonka avulla lämpötilamittausten pisteiden sijainnit saatiin dokumentoitua tarkemmin, mikä paransi tarkkuutta levityslämpötilamittausten ja poranäytteiden sijainnin välillä. Kuvassa 48 on esitetty levityslämpötilamittausten apuna käytetty mittavarsi, joka asetettiin mittauksissa reunakiveä vasten. Jokaista lämpötilalukemaa kohden kirjattiin ylös myös etäisyys reunakivestä mittavarren asteikolta.



Kuva 48. Levityslämpötilamittausta Kallvikintiellä.

Kallvikintien levityslämpötilamittaukset tehtiin systemaattisesti ennalta määrätyissä pisteissä tasaisin välimatkoin. Linjojen välimatkat mitattiin mittapyörällä ja niiden sijainnit merkittiin reunakiveen jo ennen levittimen saapumista. Linjojen välimatkoina pyrittiin käyttämään 20 metriä, mutta esimerkiksi liittymissä etäisyys saattaa hieman poiketa. Systemaattisesti mitattujen linjojen lisäksi mitattiin kaksi niin kutsuttua kylmää linjaa (101 ja 102), jotka oli tarkoitettu poranäytteiden ottoa varten, mutta niitä ei otettu huomioon keskiarvoon. Linjakartta sekä levityslämpötilamittaustulokset on esitetty liitteessä 6. Lämpötilamittaustuloksissa on kuitenkin otettava huomioon, että päällystystyön aikana satoi vettä linjojen 45 – 51 välillä ja jyrskitty pinta oli märkä vielä sateen jälkeen. Lämpötilamittausten minimi oli 77 °C, maksimi 158 °C ja keskiarvo noin 135 °C. Kuitenkin alle 110 °C:n mittaustuloksia oli vain noin 5,5 %, mikä selittää minimiin nähden suurta keskiarvoa. Kuvassa 49 on esitetty näytteenottokalusto sekä näytteenottoaikan kohdistaminen mittavarren avulla.



Kuva 49. Näytteenottokalusto ja näytteenottoaikan kohdistaminen mittavarren avulla.

5.3.3 Laboratoriokokeet ja tulosten tulkinta

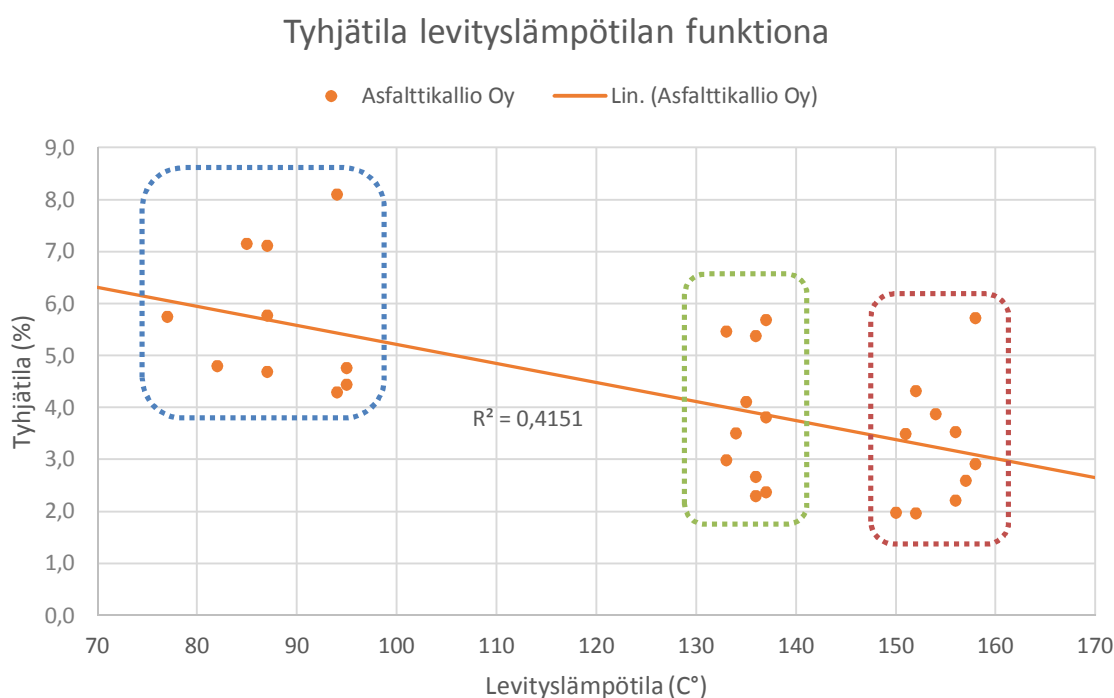
Kallvikintien MLA-päällysteestä otetuille näytteille tehtiin laboratoriokokeita taulukon 18 mukaisesti. Taulukon on merkitty myös massa ”V” (vertailu), joka tarkoittaa saman urakoitsijan vastaavaa KA-massaa. Vertailumassan näytteet on otettu Staran urakan laadunvarmistustöiden yhteydessä ja ne ovat niin kutsuttuja varanäytteitä, jotka jäivät ylimääräisiksi urakan vastaanoton jälkeen.

Taulukko 18. Kallvikintien asfalttinäytteiden laboratoriokeet.

Tutkimus	Sovellettava standardi	MLA	V
Kappaletiheys	SFS-EN 12697-6A	30 kpl	
Maksimitiheys	SFS-EN 12697-5B	30 kpl	
Tyhjätila	SFS-EN 12697-8	30 kpl	
Näytteen ulkomitat	SFS-EN 12697-29	30 kpl	12 kpl
Halkaisuvetolujuus	SFS-EN 12697-23	21 kpl	8 kpl
Jäykkyys	SFS-EN 12697-26	9 kpl	4 kpl
Vesipitoisuus		6 kpl	

V = Saman urakoitsijan samana kautena tekemä vastaava KA-massa

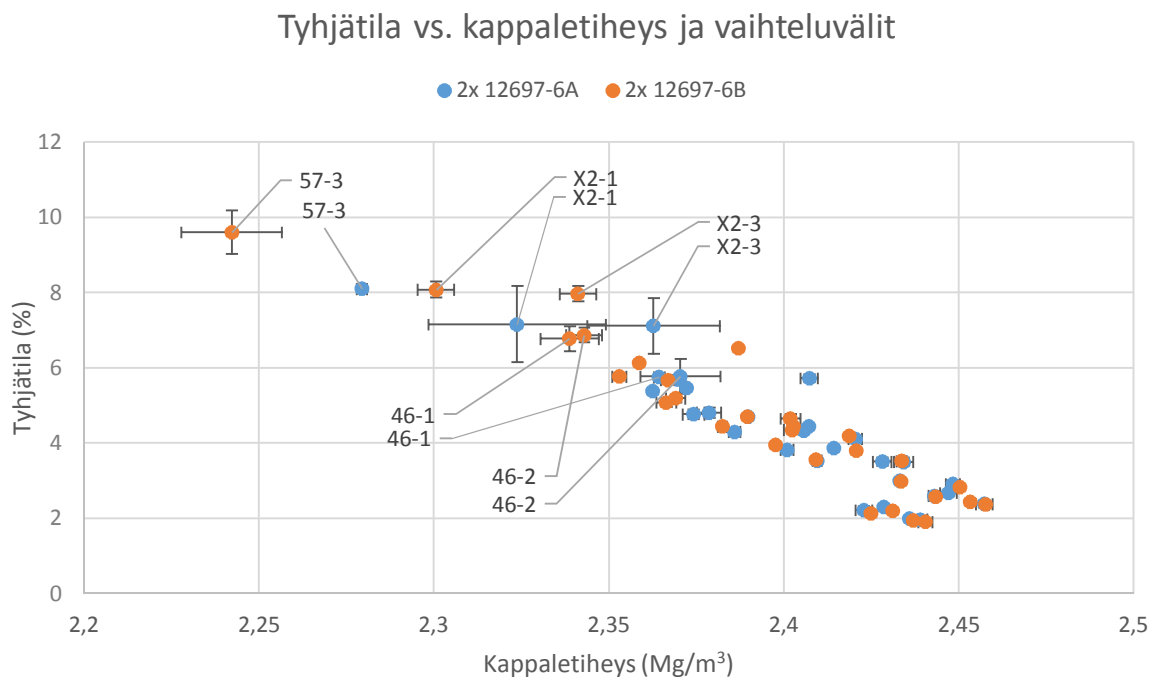
Kallvikintien tyhjätilatutkimuksissa noudatettiin samaa periaatetta kuin Vuotiellä eli näytteiden sijainnit valittiin levityslämpötilamittausten perusteella. Näytteitä otettiin kuitenkin kolmelta erilaiselta levityslämpötilaväliltä eli kylmältä (77 – 95 °C), normaalilta (133 – 137 °C) ja kuumalta (150 – 158 °C). Kolmen lämpötilavälin tarkoituksena oli tarkentaa levityslämpötilan ja tyhjätilan välisen korrelaation määrittystä. Kaikista näytteistä määritettiin kappaletiheys menetelmällä SFS-EN 12697-6A kahdesti virhelähteiden vähentämiseksi ja tyhjätilamäärittämisessä käytettiin kappaletiheyyksien keskiarvoa. Poranäytteiden maksimitiheys määritettiin molemmiin puolin sahatuista kappaleista HVL- ja jäykkyyskokeiden jälkeen. Kuvassa 50 on esitetty Kallvikintien poranäytteiden tyhjätilatutkimusten tulokset levityslämpötilan funktiona.



Kuva 50. Kallvikintien tyhjätilatutkimusten tulokset levityslämpötilan funktiona.

Levityslämpötilamittausten ja näytteenottopisteiden sijainnin tarkkuuden parantamisen sekä suuremman näytemäärän ansiosta levityslämpötilan ja tyhjätilan välille saatiin hieman parempi korrelaatio kuin Vuotien tutkimuksissa. Korrelaatio ei kuitenkaan vielä ole niin

selvä kuin oli odotettavissa ja menetelmän tarkkuutta tulisi parantaa edelleen etenkin lämpötilamittausten osalta. Myös jyräskertojen lukumäärä vaikuttaa päällysteen tiiveyteen, mutta kertojen laskeminen kenttäolosuhteissa on hankalaa, ellei jyrää seurata esimerkiksi tarkan GPS-laitteen avulla. Lisäksi myös tyhjätilan määrittäminen laboratorioissa on hieman virhealtis etenkin, kun kappaleitiheys on alhainen. Kuvassa 51 on esitetty Kallvikintien poranäytteiden kappaleitiheyden tutkimustuloksia menetelmillä SFS-EN 12697-6 A sekä B. Kappaleitiheyden määrittäminen toistettiin kahdesti molemmilla menetelmillä, jolloin voitiin laskea myös karkeat vaihteluvälit niin kappaleitiheydelle kuin tyhjätilallekin. Kuvasta nähdään, että lähes poikkeuksetta molemmilla menetelmillä vaihteluvälit kasvavat, kun kappaleitiheys pienenee ja tyhjätila kasvaa.



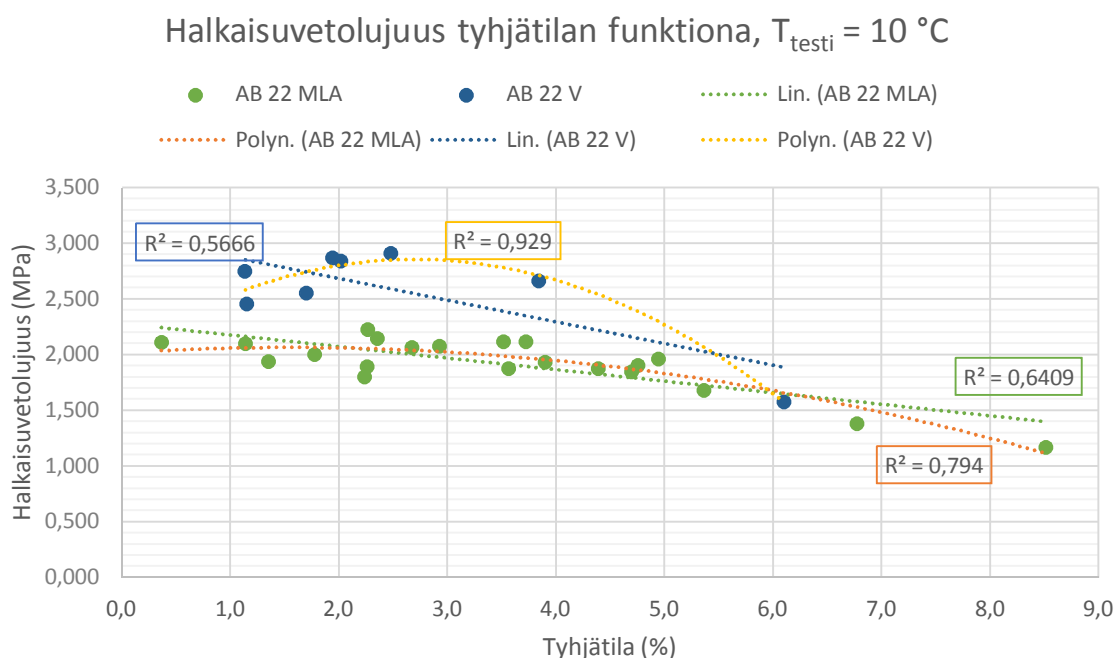
Kuva 51. Tyhjätila vs. kappaleitiheys ja vaihteluvälit.

Poranäytteille tehtiin HVL- ja jäykkyyskokeita, joita varten näytteet sahattiin kaksiteräsahalla noin 30 mm korkeiksi, vaikka standardissa SFS-EN 12697-23 vaadittu näytteen korkeus on 35 – 75 mm. Korkeudeksi valittiin 30 mm, koska osa näytteistä oli vain noin 40 mm korkeita alun perin sekä koska haluttiin varmistaa, että HVL-kokeissa puristuslaitteiston kapasiteetti riittää 10 °C:n testauslämpötilassa. Standardissa SFS-EN 12697-26 vaaditaan, että jäykkyyden määrittämisessä käytettävien näytteiden iän tulisi olla 14 – 42 päivää ja mahdolliset sahaukset tulisi tehdä viimeistään kahdeksan päivää tiivistyksen jälkeen. Tässä tutkimuksessa poikettiin standardin menettelystä merkittävästi, sillä näytteitä oli säilytetty huoneenlämmössä 5 – 7 kuukautta, koska jatkotutkimuksista päätettiin vasta myöhemmin. HVL- ja jäykkyyskokeita tehtiin myös vertailumassalle, jonka näytteet oli porattu kahdelta kohteelta. Toinen näistä kohteista oli myös Kallvikintiellä kuten MLA-koekohde, mutta noin kilometrin päässä koekohteesta. Taulukossa 19 on esitetty näytteiden koestuspäivät sekä kulunut aika niiden valmistuksesta, porauksesta ja sahauksesta ennen koestusta.

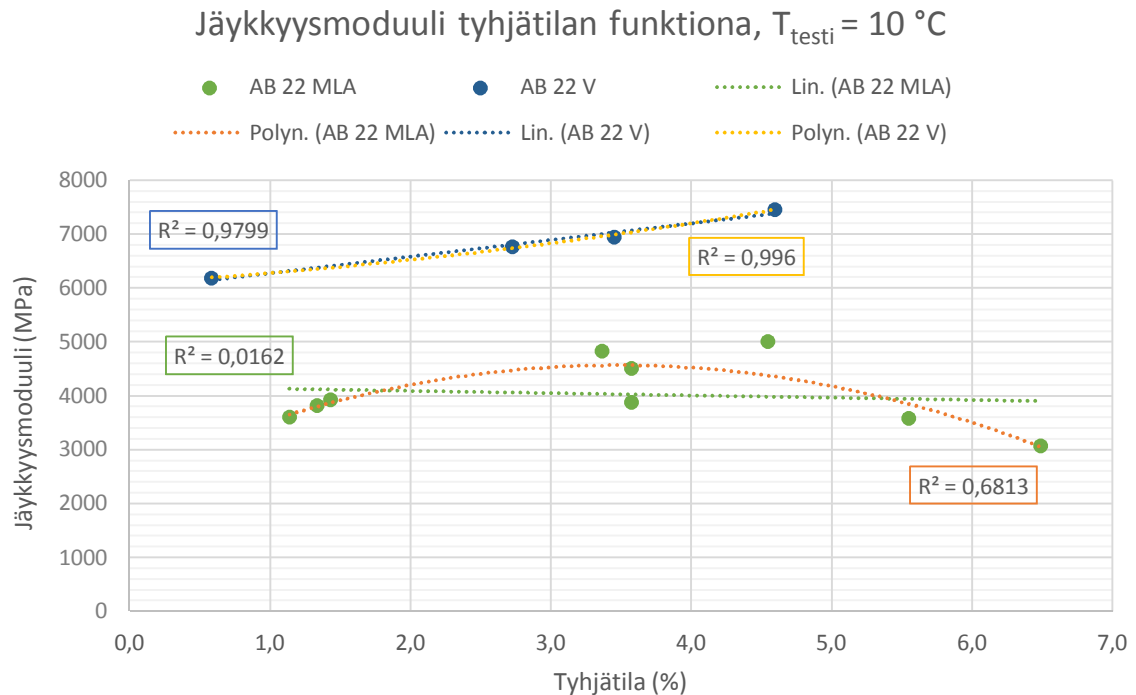
Taulukko 19. HVL- ja jäykkyyskokeiden näytteiden koestuspäivät.

Kohde	Massalaji	Koestuspäivä	Päiviä valmistuksesta	Päiviä porauksesta	Päiviä sahauksesta
Kallvikintie	AB 22 MLA	8.3.2016	166	147	28
Kallvikintie "vertailu"	AB 22 V	22.4.2016	207	191	23
Porslahdentie "vertailu"	AB 22 V	22.4.2016	212	207	23

HVL- ja jäykkyyskokeiden tuloksia on esitetty liitteessä 7 sekä kuvissa 52 ja 53, joissa tulokset on piirretty kuvaajiin tyhjätilan funktiona. Kuvissa tyhjätilan vaikutusta tuloksiin on mallinnettu lineaarisen regression (suoran) ja epälineaarisen kuvauksen (paraabeli) avulla. Näyttäisi, että tuloksiin vaikuttaa muitakin muuttujia kuin vain tyhjätila, sillä tyypillisesti asfaltin jäykkyys ja lujuus alenevat, kun tyhjätila kasvaa.



Kuva 52. HVL-kokeiden tulokset, testauslämpötila 10 °C .



Kuva 53. Jäykkyyshkokeiden tulokset, testauslämpötila 10 °C.

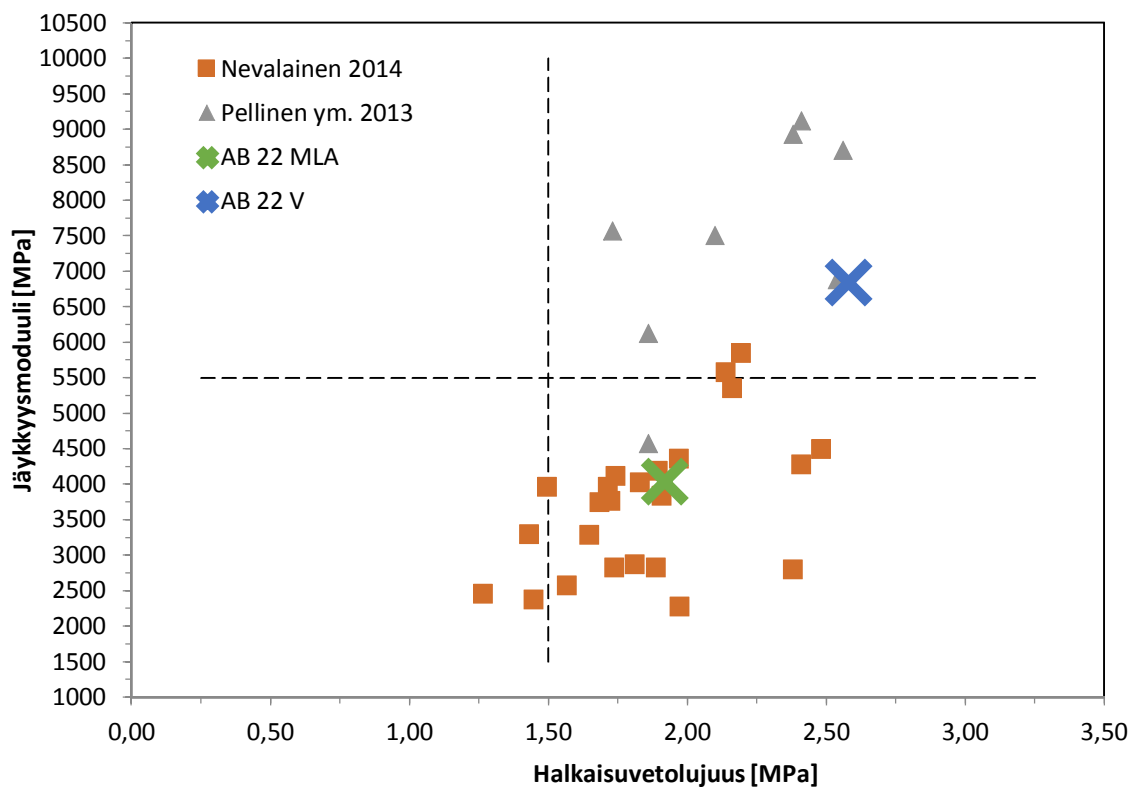
Kuvista nähdään, että molemmissa kokeissa vertailumassan arvot olivat suurempia kuin MLA-massan vaikka tyhjätilat olivat melko vastaavia. Kirjallisuusselvityksen perusteella pienemmät arvot olivat kuitenkin odotettavissa, sillä vastaavia eroja on havaittu esimerkiksi verrattaessa Rediset WMX -lisäaineen avulla valmistetun MLA:n jäykkyyksiä vastaavan KA:n jäykkyyksiin. MLA-massan vertailumassaa alhaisempia jäykkyyden arvoja saattaa selittää sideaineen vähäisempi vanheneminen valmistusprosessissa, jolloin sen jäykkyys ei kasva yhtä paljon kuin KA-massaa valmistettaessa. MLA-massassa käytettiin kuitenkin 30 % asfalttirouhetta, jonka sideaineen voidaan olettaa vanhentuneen jo aikaisemmassa käytössä. Vertailumassan näytteet olivat myös yli kuukauden MLA-massan näytteitä vanhempia. Päällysteiden vanhetessa HVL- ja jäykkyyshkokeiden tulosten väliset erot voivat tasaantua, sillä MLA-päällysteiden jäykkyyden kasvun on havaittu olevan nopeampaa kuin KA-päällysten.

Tulosten perusteella halkaisuvetolujuus korreloi hyvin tyhjätilan kanssa, joskaan ei välttämättä lineaarisesti. Kuitenkin jäykkyyshkokeiden korrelaatiosta ei voida tehdä päätelmiä, sillä MLA-massalla korrelaatiokertoimet olivat pieniä verrattuina vertailumassan erittäin suuriin kertoimiin vaikka näytemäärä oli melko pieni. Vertailumassan korrelaatio oli kuitenkin väärän suuntainen eli tyhjätilan kasvaessa jäykkyys kasvoi. Syynä poikkeavaan korrelaatioon saattaa kuitenkin olla pitkä säilytysaika, jonka aikana näytteiden sideaine on vanhentunut ja jäykistynyt etenkin näytteillä, joilla on suurempi tyhjätila. Vastaavaa ilmiötä ei kuitenkaan havaittu MLA-massan näytteiden osalta. Lisäksi näytteiden maksimiraekokoon nähden niiden korkeus oli hyvin pieni, mikä on myös todennäköisesti vaikuttanut tuloksiin. Jäykkyyshkokeiden tulokset eivät aina täyttäneet standardin vaatimuksia, sillä kappaleiden koestustulokset poikkesivat liikaa eri suunnissa, mikä voi viitata juuri liian matalien näytteiden koestukseen. Tuloksiin on siis voinut vaikuttaa ainakin kolme muuttujaa eli tyhjätila, näyt-

teen ikä sekä sen korkeus. Tämä tekee mekaanisten ominaisuuksien tulosten tulkinnan vaikeaksi. On siis kysymys absoluuttisista ja suhteellisista eroista ja niiden tunnistamisesta oikean tulkinnan ja päätelmien tekemiseksi.

Kuvassa 54 on esitetty HVL- ja jäykkyyskoetuloksia kahdesta tutkimuksesta sekä Kallvikintien tutkimustulosten keskiarvot MLA- ja vertailumassoille. Nevalaisen (2014) tutkimuksessa näytteet olivat SMA 16- tai SMA 22 -massaa ja ne otettiin heti tai korkeintaan 1,5 kuukauden päästä levityksestä valtateiltä 1, 3 ja 4. Pellisen ym. (2013) tutkimuksessa HVL- ja -jäykkyyskoeteita varten Kehä II:lta otettiin näytteitä pääosin vanhoista Rem-toimenpiteellä kierrätetyistä SMA 16 -päällysteistä, joiden ikä oli 3 – 4 vuotta. Toisaalta tutkimuksessa oli lisäksi näytteitä täysin uudesta sekä jopa 9 vuotta vanhasta SMA 16 -laatasta. Päällysteiden ja näytteenoton takia kuvassa 54 esitetyt vertailut ovat suhteellisia päällysteen ikään nähden.

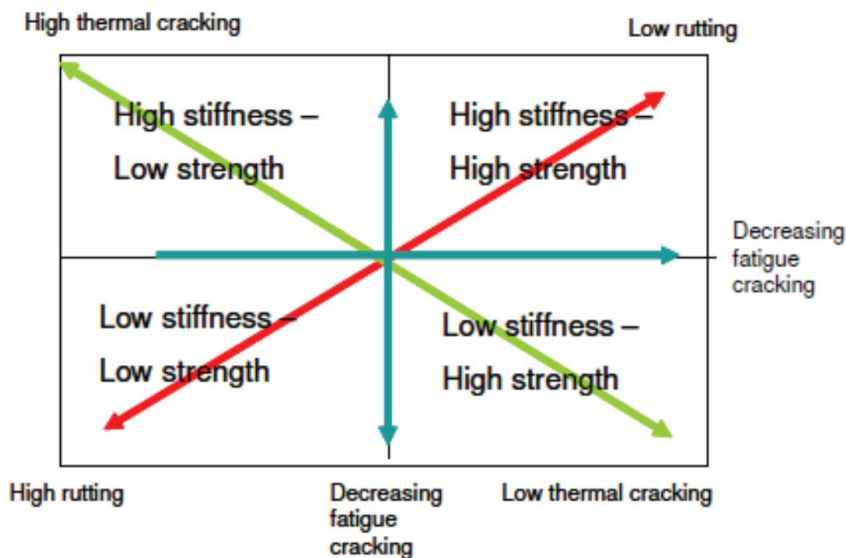
Kuvassa 54 on esitetty myös alustavia raja-arvoja, joiden perusteella päällysteiden ominaisuuksia voidaan arvioida kuvan 55 mukaisesti. Nämä raja-arvot perustuvat muun muassa Kehä II:n testaustuloksiin ja niitä tarkennetaan Aalto-yliopiston toimesta, kun saadaan enemmän testaustuloksia suomalaisten päällysteiden mekaanisista ominaisuuksista. On tärkeä huomata, että päällysteen iällä on merkittävä vaikutus jäykkyyteen ja lujuuteen bitumin vanhenemisen takia ja se tulisi ottaa yhdeksi muuttujaksi raja-arvoja asetettaessa.



Kuva 54. Halkaisuvetolujuuteen ja jäykkyyssmoduuliin perustuva kestävyystarkastelu.

Pellinen (2004) on ehdottanut kuvan 55 mukaista kestävyystarkastelumallia, jossa päällysteen kestävyyttä voidaan arvioida sen jäykkyyden ja lujuuden perusteella. Kuvien 54 ja 55 perusteella vertailumassan deformaatiokestävyys kadun liikennemäärä huomioiden on riit-

tävä ja myös väsymishalkeilun todennäköisyys pieni, mutta päällyste saattaa olla altis lämpöhalkeilulle. MLA-massan voidaan tulkita olevan alttiimpi deformaatiolle kuin vertailumassan, mutta MLA-massan lämpöhalkeilun todennäköisyys on puolestaan pienempi. Myös MLA-massan väsymishalkeilun todennäköisyys on pieni. MLA-massa sijoittui kuvaajassa samalle alueelle kuin Nevalaisen tutkimuksessa koestettut SMA-näytteet, vaikka SMA-päällysteet ovat ensisijainen vaihtoehto vilkasliikenteisimmille teille niiden kestävyysanansiosta. Toisaalta Nevalaisen tutkimuksessa SMA-näytteiden ikä oli pieni verrattuna tämän tutkimuksen MLA-näytteiden ikään, mikä osaltaan selittää SMA:n alhaisempia jäykkyyssarvoja. Kehä II:lta otetut näytteet olivat puolestaan jo käytössä vanhentuneita, mikä myös näkyy tuloksissa korkeampina jäykkyyssarvoina.



Kuva 55. Kestävyystarkastelun periaate (Pellinen 2004).

Kallvikintien päällystystyön yhteydessä otettiin myös massanäytteitä levitetystä tiivistämättömästä asfalttimassasta. Näytteiden tarkoituksena oli selvittää asfalttimassan vesipitoisuus ja ne suljettiin mahdollisimman pian näytteenoton jälkeen muoviasiioihin, jotka tiivistettiin ilmatiiviiksi ilmastointiteipin ja ikkunatiivisteiden avulla. Kuvassa 56 on esitetty massanäyte ilmatiiviissä muoviasiassa kohteella. Astioiden ilmatiiveys varmistettiin vielä laboratoriossa puristamalla astian kantta alaspäin, jolloin astian reunat pullistuivat eikä ilmaa päässyt ulos astiasta.



Kuva 56. Massanäyte ilmatiiviissä muoviastiassa Kallvikintiellä.

Massanäytteiden vesipitoisuuden määrittämiselle ei ole valmista menetelmää ja tästä syystä toimintatapa on kuvattu yksityiskohtaisesti. Menettelyn perusteet ja laskenta soveltuvat kuitenkin standardiin SFS-EN 17892-1 (Vesipitoisuuden määrittäminen)

Massanäytteiden vesipitoisuus määritettiin laboratoriossa seuraavasti:

1. Punnittiin massanäytteen, muoviastian ja tiivisteiden yhteismassa ($m_w + m_{\text{muovit}}$)
2. Avattiin astian tiivisteet ja kansi varovasti ja siirrettiin massanäyte metalliastiaan, jonka massa (m_{pelti}) oli aiemmin mitattu.
3. Punnittiin tyhjän astian, kannen sekä kaikkien tiivistemateriaalien massa (m_{muovit})
4. Massanäyte asetettiin metalliastiassa kuivausuuniin, jossa lämpötila oli 105 °C.
5. Vaiheet 1-4 toistettiin kaikille näytteille ja niiden annettiin kuivua uunissa yön yli.
6. Seuraavana päivänä näytteet nostettiin ulos kuivausuunista ja niiden annettiin jäähtyä pöydällä, koska riittävän suurta eksikkaattoria ei ollut saatavilla.
7. Punnittiin näytteiden ja niiden metalliastioiden yhteismassat ($m_{\text{pelti}} + m_d$)

Neljännän näytteen tutkimuksissa huomattiin, että astian kannen ja ilmastointiteipin väliin oli päässyt vettä näytteen ollessa avonaisen pakettiauton tavaratilan reunalla vesisateen aikana. Astia oli kuitenkin ilmatiivis, mutta vettä ei huomattu ennen tiivisteiden poistoa, jolloin osa vedestä pääsi valumaan kannelta lattialle. Jos kaikki vesi olisi pysynyt kannella tiivisteiden poiston aikana, sen massa olisi voitu ottaa huomioon astian ja tiivisteiden yhteismassassa, jolloin sillä ei olisi ollut vaikutusta tuloksiin. Veden massaa ei kuitenkaan voitu enää määrittää ja tästä syystä neljännän näytteen vesipitoisuus poikkeaa muista näytteistä.

Kuivien ja jäähtyneiden näytteiden punnitusten yhteydessä havaittiin, että näytteiden massa oli suurempi kuin alkuperäinen massa eli vesipitoisuudeksi saatiin negatiivinen arvo. Tämän syyksi arveltiin ilmankosteuden imeytymistä näytteisiin niiden jäähtyessä. Näytteet suljettiin kohteella ilmatiiviiseen astiaan niiden ollessa lämpimiä eli niihin ei ollut sitoutunut kosteutta ilmasta. Tästä syystä näytteet lämmitettiin uudestaan noin 100 °C:n lämpöisiksi ja niiden

massat määritettiin uudestaan lämpiminä, jolloin ilmankosteus ei päässyt vaikuttamaan tuloksiin. Vesipitoisuudet laskettiin tämän jälkeen uudelleen ja arvot olivat positiivisia, mutta hyvin pieniä eli vain noin 0,02 – 0,04 %. Taulukossa 20 on esitetty massanäytteiden vesipitoisuusmääritysten tuloksia.

Taulukko 20. Kallvikintien massanäytteiden vesipitoisuudet.

Näyttenumero		1	2	3	4	5	6
m _w + m _{muovit} (g)		2364,66	2194,88	2196,84	1991,78*	1965,92	2027,95
m _{muovit} (g)		190,60	178,22	178,90	183,39*	182,41	187,82
m _w (g)		2174,06	2016,66	2017,94	1808,39	1783,51	1840,13
m _{pelti} (g)		384,56	381,83	385,01	384,42	388,42	382,79
20 °C	m _{pelti} + m _d (g)	2559,20	2398,88	2403,21	2192,57	2172,38	2223,43
	m _d (g)	2174,64	2017,05	2018,20	1808,15	1783,96	1840,64
	m _{vesi} (g)	-0,58	-0,39	-0,26	0,24	-0,45	-0,51
	w (%)	-0,03	-0,02	-0,01	0,01*	-0,03	-0,03
100 °C	m _{pelti} + m _d (g)	2558,11	2397,78	2402,25	2191,58	2171,48	2222,46
	m _d (g)	2173,55	2015,95	2017,24	1807,16	1783,06	1839,67
	m _{vesi} (g)	0,51	0,71	0,70	1,23	0,45	0,46
	w (%)	0,02	0,04	0,03	0,07*	0,03	0,03

*Poikkeavat tulokset. Vesipisaroita näyteastian päällä ei havaittu riittävän ajoissa.

Tuloksista voidaan tulkita, että massanäytteistä ei tämän menettelyn aikana haihtunut merkittävää määrää vettä. On kuitenkin mahdollista, että kiviainekseen mahdollisesti jäänyt kosteus ei päässyt haihtumaan, sillä kiviaines oli täysin peittynyt sideaineella. Vaikka asfalttimassan lämpötila oli noin 105 °C:a kuivauksen aikana ja kiviainekseen jäänyt kosteus olisi höyrystynyt sideaineen alla, on mahdollista, etteivät höyrykuplat päässeet kulkeutumaan sideainekalvon ulkopuolelle. Lisäksi on mahdollista, että massan muutokseen vaikuttaa sideaineen hapettuminen. Kuitenkin sideaineesta aiheutuvien kokonaispäästöjen on sanottu olevan vain noin 1 mg/h 150 °C:n lämpötilassa eli sideaineen massan muutos 105 °C:n lämpötilassa on hyvin epätodennäköistä. Levityslämpötilamittausten perusteella MLA-massan sekoituslämpötila on ollut välillä jopa yli 160 °C, mikä tarkoittaa, että kiviaines on luultavasti kuivattu huolellisesti kosteusvaurioiden välttämiseksi. Kuten sanottu, menettely oli kokeellinen ja virhelähteiden arviointi on lähinnä spekulatiivista.

6 Pohdintaa ja suositukset

6.1 Asfalttimassojen luokittelu valmistuslämpötilan perusteella

Suomessa kuumien asfalttimassojen tyypillinen valmistuslämpötila vaihtelee yleensä 140 °C:n ja 200 °C:n välillä käytettävän bitumilaadun ja valmistettavan massan mukaan. Tällä tavallisella lämpötilavälillä valmistettua massaa kutsutaan kansainvälisesti HMA:ksi (Hot Mix Asphalt) eli kuuma-asfaltiksi. Suomessa nimenomaan kuuma-asfalteista puhutaan niiden tyyppinimillä, eikä valmistuslämpötilan mukaiselle luokittelulle ole aiemmin ollut tarvetta. Luokittelun käyttöönotto on kuitenkin olennaista, jotta perinteisten kuuma-asfalttien ja matalalämpöasfalttien välille saadaan selvä raja.

Asfalttimassat voidaan luokitella valmistusmenetelmän ja -lämpötilan perusteella neljään eri luokkaan (EAPA 2014). Luokittelu pelkän valmistuslämpötilan perusteella ei ole riittävän yksiselitteistä, sillä esimerkiksi käytettäessä pehmeitä tiebitumeita, voidaan perinteistä kuuma-asfalttia valmistaa alle 140 °C lämpötilassa. Pelkän valmistuslämpötilan mukaisessa luokittelussa edellä kuvatut kuuma-asfaltit voitaisiin luokitella matalalämpöasfalteiksi, mikä saattaisi aiheuttaa väärinkäsityksiä tilaajan ja urakoitsijan välille. Matalalämpöasfalttien on yleisesti tarkoitus toimia vaihtoehtoina kuuma-asfalteille siten, että päällysteiden kestävyys ovat vertailukelpoisia, vaikka valmistuslämpötilaa on laskettu. Tästä syystä luokittelussa tulee ottaa huomioon valmistuslämpötilan lisäksi erilaiset valmistusmenetelmät sekä tyyppilliset käyttökohteet, jotka rajaavat esimerkiksi matalalämpöasfaltit selvästi omaksi luokakseen.

Suomessa vähäliikenteisillä teillä käytetty pehmeä asfalttibetoni (PAB) voidaan joissakin tapauksissa mieltää puolimatalalämpöasfaltiksi, sillä esimerkiksi PAB-massan valmistamisessa turboasemalla hyödynnetään kuumaa vesihöyryä kiviaineksen lämmityksessä, minkä ansiosta sekoituslämpötilaa voidaan laskea. Yleisesti PAB-B-massat voidaan kuitenkin luokitella kuuma-asfalteiksi, vaikka niiden valmistuslämpötila onkin matalampi kuin kuuma-asfalteilla tyypillisesti. PAB-B-massojen valmistuksessa käytetään pehmeitä sideaineita, jotka eivät saavuta muissa kuuma-asfalteissa käytettyjen sideaineiden viskositeettia käyttölämpötiloissa, kuten kuvassa 3 on esitetty. Ilman turboa valmistetut PAB-V-massat voidaan puolestaan luokitella kylmäasfalteiksi, koska niissä käytettyjen V1500 ja V3000 sideaineiden sekoitusviskositeetti saavutetaan alle tai lähes 100 °C:n lämpötilassa, eikä kiviainesta kuivata.

Taulukossa 21 on esitetty valmistuslämpötilaan ja -menetelmään perustuva suositus luokitteluksi, luokkien lyhenteet ja niiden englanninkieliset vastineet, tyypillinen valmistuslämpötilan vaihteluväli sekä jaottelua selventäviä lisähuomioita.

Taulukko 21. Suositus asfalttimassojen luokitteluksi valmistuslämpötilan ja -menetelmän mukaan.

Massan luokitus (suom.)	Massan luokitus (eng.)	Valmistus- lämpötila	Valmistus- tapa	Kiviaines	Tyypillinen käyttökohde
Kuuma-asfaltti KA	Hot Mix Asphalt HMA	140 – 200 °C (> 110 °C)	Perinteinen	Kuivattu	Tiet ja kadut (KVL > 500 ajon.)
Matalalämpöasfaltti MLA	Warm Mix Asphalt WMA	110 – 140 °C	MLA teknologiat*	(Kuivattu)	
Puolimatalalämpöasfaltti PMLA	Half Warm Mix Asphalt HWMA	65 – 100 °C		Kuivaama- ton	Vähäliikenteiset tiet ja kadut, paikkaukset
Kylmäasfaltti KyA	Cold Mix Asphalt CMA	≈ 25 °C (< 100 °C)	Perinteinen		

*Sideainetta muunneltu siten, että valmistuslämpötilaa on voitu laskea vaikuttamatta päällysteeltä vaadittuihin ominaisuuksiin.

Asfalttimassan luokittelu matalalämpöasfaltiksi edellyttää, että valmistuslämpötilaa on voitu laskea sideainetta muuntelemalla, kuten kappaleessa 2.2 on esitetty. Puolimatalalämpöasfaltit ja matalalämpöasfaltit erotellaan toisistaan valmistuslämpötilan perusteella siten, että alle 100 °C:ssa valmistetut massat mielletään puolimatalalämpöasfaltteiksi (D'Angelo ym. 2008). Keskeisin ero näiden kahden luokan välillä on siis kiviaineksen kuivaus eli matalalämpöasfalttia valmistettaessa kiviaineksen tulisi olla täysin kuivattua. Hurley & Prowell (2006a) totesivat, että alempi valmistus- ja tiivistyslämpötila voi aiheuttaa kiviaineksen epätäydellistä kuivumista, mikä saattaa johtaa kosteusvaurioihin. He havaitsivat myös, että 121 °C:ssa valmistetuilla KA ja MLA massoilla oli huonommat vetolujuus- sekä tartuntaominaisuudet, mutta niiden parantaminen onnistuu lisäaineita käyttämällä. Tästä syystä matalalämpöasfaltin valmistuslämpötilan olisi kuitenkin parempi olla huomattavasti yli veden kiehumispisteen etenkin, jos valmistuksessa ei käytetä tartukkeita. Myös asfalttiaseman tyypillä voi olla vaikutuksia kiviaineksen kuivumiseen. Yhdysvalloissa käytetään tyypillisesti rumpuasemia, joissa kiviaines kuivataan ja sekoitetaan sideaineen kanssa samassa rummussa jatkuvatoimisesti. Ongelmat kiviaineksen kuivauksessa saattavat korostua etenkin rumpuasemilla, mutta annosaseilla kiviaineksen kuivausta voidaan luultavasti hallita paremmin, sillä kiviaines kuivataan rummussa ennen asfalttimassan valmistusta erillisessä sekoittimessa.

Kylmäasfaltti valmistetaan tyypillisesti ympäristön lämpötilassa lämmittämättömästä kiviaineksesta sekä bitumiemulsiosta tai vaahdotetusta bitumista (EAPA 2014). Kuitenkin joissakin tapauksissa kylmäasfaltin valmistuksessa voidaan käyttää korkeampiakin lämpötiloja.

6.2 Matalalämpöasfalttien käyttömahdollisuudet

6.2.1 Laatuvaatimukset ja CE-merkintä

Matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmien erojen vuoksi MLA-massojen käyttöä tulisi harkita aina tapauskohtaisesti. Suomessa valmistusmenetelmistä ei kuitenkaan ole ollut kattavia tietoja saatavilla eli MLA-massojen käyttö pysynee koeluonteisena vielä toistaiseksi. Toisaalta koekohteiden tilaaminen on aina kannattavaa, sillä niiden avulla saadaan arvokasta tietoa MLA-päällysteiden kestävyydestä, kunhan vähintään kohteen perustiedot dokumentoidaan tarkasti ja julkaistaan. MLA-päällysteiden yleistymisen kannalta koekohteet ovat käytännössä ainoa tapa saada konkreettista aineistoa MLA-päällysteiden pitkäaikaisestä

vyydestä Suomen oloissa. Kuitenkin, jos nykyisten Suomessa saatavilla olevien MLA-masojen valmistusmenetelmiä muutetaan, eikä muutoksista anneta mitään tietoja, palataan MLA:n käytössä taas lähtötilanteeseen.

Asfalttimasojen tuotteistaminen ja niiden koostumuksen sisällyttäminen liikesalaisuuksien piiriin on toisaalta hieman kyseenalaista, sillä esimerkiksi Asfalttinormeissa on asetettu vaatimuksia asfalttimasojen koostumukselle ja ominaisuuksille. Jos MLA-massasta ei saada riittävästi tietoja, ei sen voida olettaa täyttävän Asfalttinormien vaatimuksia, milloin myös sen tilaaminen muussa kuin koekäytössä on riskialtista. Myös CE-merkin kiinnittäminen tarkoittaa, että asfalttimassan koostumuksen ja ominaisuuksien tulee olla vaatimusten mukaisia. Lisäksi CE-merkissä vaaditaan, että urakoitsija ilmoittaa asfalttimassan minimi- ja maksimilämpötilat asfalttiasemalla. Nähtäväksi jää, mitkä MLA-massoille ilmoitetut maksimilämpötilat ovat CE-merkeissä, sillä tuotestandardissa lämpötilalle on määritetty vain maksimiarvoja, jotka esitettiin taulukossa 2.

6.2.2 Kulutuskestävyys

Koekohteiden tyhjätilatutkimusten perusteella voidaan todeta, että MLA-päällysteet saadaan tiivistettyä riittävän tiiviiksi matalissakin lämpötiloissa, mutta epäonnistumisen mahdollisuus kasvaa päällystelaatan jäähtyessä kuten perinteisillä kuuma-asfalteillaakin. MLA-päällysteiden tyhjätiloja kannattaakin tutkia poranäytteiden avulla jatkossakin, vaikka levityslämpötilamittauksia ei toteutettaisikaan.

Matalamman valmistuslämpötilan vuoksi MLA-päällysteen sideaine vanhenee yleensä vähemmän valmistuksen yhteydessä, mikä voi tarkoittaa esimerkiksi alhaisempia jäykkyyshäviöarvoja kuin vastaavalla KA:lla, kuten kirjallisuuden ja tutkimustulosten perusteella havaittiin. Kirjallisuusselvityksen yhteydessä havaittiin myös, että MLA:t voivat olla alttiimpia kosteusvaurioille niiden käyttöiän alussa kuin vastaavat KA:t, mutta MLA-päällysteen vanheneminen kesän aikana nostaa sen kestävyysarvot KA:ta vastaavaksi. Toisaalta kosteusvaurioherkkyyttä voidaan kompensoida tartukkeiden avulla, mutta niiden soveltuvuus tulisi aina selvittää tapauskohtaisesti. Tässä tutkimuksessa kohteelta otetuissa massanäytteissä ei kuitenkaan havaittu merkittävää määrää vettä, mutta kohteen MLA:n sekoituslämpötila oli melko korkea.

MLA-päällysteitä kannattaa näiden syiden takia levittää alkukesästä, jolloin päällyste ehtii vanheta ennen kuin se altistetaan kylmille ja märille olosuhteille etenkin, jos asfalttimassassa ei käytetä tartukkeita. On kuitenkin mahdollista, että MLA-päällysteeseen syntyy merkittäviä alku-uria kesän aikana, jos päällysteen deformaatiokestävyys laskee valmistusprosessin muutosten takia. Koekohteiden uraprofiilimitausten perusteella ei havaittu alku-urautumista, mutta ensimmäisen kesän aikana MLA-päällysteet saattoivat deformoitua hieman enemmän kuin vertailupäällyste, mutta tutkimustulokset eivät olleet täysin selviä. Myös suurempaa deformaatiota voi selittää päällysteen jäykkyyden alentuminen sideaineen vähäisemmän vanhenemisen takia.

Nastarengasurautumisen osalta tutkimustulosten perusteella voidaan todeta vain, että kiviaineksella on merkittävin vaikutus urautumiseen. Vertailtavien päällysteiden kiviainesten erojen takia tuloksien perusteella ei voida tehdä päätelmiä MLA:n valmistusmenetelmien vaikutuksista kulumisuraan. Koekohteen urautumisen kehitystä on tarkoitus seurata vielä jatkossa ainakin vuoden ajan.

Visuaalisen tarkastuksen perusteella koeobjekteilla ei havaittu vaurioita 1-2 vuoden liikennekuormituksen jälkeen. Koska alustavat kokeilut ovat olleet rohkaisevia, voisi matalalämpöasfaltti olla hyvinkin varteenotettava vaihtoehto esimerkiksi kevyenliikenteenväylien tai ABK-päällysteiden osalta, sillä niihin kohdistuvat rasitukset ovat huomattavasti pienempiä kuin ajoratojen kulutuskerroksilla ja kun kokemuksia karttuu, voidaan siirtyä enenevässä määrin katujen päällystämiseen. Hieman alle puolet Staran urakoissa levitettävistä AB-massoista on raekooltaan 8 mm, 11 mm tai 32 mm, mikä vastaa vuosittain noin 39 000 tonnia asfalttimassaa.

6.2.3 Päästövähennykset ja taloudelliset vaikutukset

Kuten kirjallisuusselvityksessä kävi ilmi, asfalttimassan valmistuksesta aiheutuvien kasvihuonepäästöjen määrä on suoraan verrannollinen käytetyn polttoaineen määrään. Päästöjen suuruuteen vaikuttaa kuitenkin muitakin muuttujia, kuten esimerkiksi kiviaineksen kuivauksessa käytetyn polttimen säädöt sekä käytettävä polttoaine. On mahdollista, että asfalttimassojen valmistuksesta aiheutuvia päästöjä voitaisiin vähentää pelkästään käyttämällä ympäristöystävällisempää polttoainetta kuten esimerkiksi maakaasua, vaikka tosin sekin on fossiilinen polttoaine.

MLA:n valmistusmenetelmien alhaisempi valmistuslämpötila tarkoittaa siis säästöjä energiankulutuksessa ja siten vähäisempiä kasvihuonepäästöjä. Kuitenkin toteutuneiden päästövähennysten kohdennettu todentaminen asfalttiasemalla on erittäin hankalaa, koska asfalttimassoja voidaan valmistaa saman päivän aikana useisiin eri kohteisiin. Yksi tapa vähentää kaupungin toimivallan piirissä olevia päästöjä on kannustimien käyttö. Esimerkiksi urakoitsijoita voitaisiin palkita MLA:n käytöstä kevyenliikenteenväylillä sekä ABK-kerroksissa, jos asfalttiasemien vuosiraporttien perusteella voitaisiin todeta, että päästöjä on todella saatu vähennettyä. Jos päästövähennyksiä ei voida todentaa mitenkään, ei MLA-päällysteiden käyttö ole taloudellisesti kannattavaa, koska MLA-massojen hinta on perinteisiä asfalttimassoja korkeampi.

MLA:n hinta on koeobjektien perusteella niin korkea, ettei sen käyttö ole missään nimessä järkevää päästövähennysten taloudellisten kokonaisvaikutusten kannalta. Toisin sanoen samalla sijoituksella voidaan tehdä paljon merkittävämpiä muutoksia muilla aloilla kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. On kuitenkin odotettavissa, että jos MLA:n käyttö yleistyy, myös sen yksikköhinta laskee, milloin sen käytöstä voi olla hyötyä.

Vaikka ongelmat päästöjen todentamisessa ja kustannuseroissa saataisiin korjattua, mahdolliset päästövähennykset ovat marginaalisia koko Helsingin kaupungin ilmastotavoitteessa. Kuitenkin vähäisetkin päästövähennykset ovat hyödyksi ja myös fossiilisten polttoaineiden kulutuksen vähentäminen voidaan nähdä ainoastaan etuna.

Levityslämpötilamittauksissa havaittiin MLA:lle myös hyvin korkeita (> 150 °C) lämpötiloja, mikä tarkoittaa, että sekoituslämpötila on ollut ajoittain hyvin korkea. Jos MLA:n sekoituslämpötila nousee toistuvasti KA:n sekoituslämpötiloihin, ei matalalämpöasfaltin perustavoite energiankulutuksen vähentämisestä toteudu.

Tässä tutkimuksessa ei selvitetty kuljetusäisyyksien vaikutuksia kasvihuonepäästöihin, koska on odotettavissa, että valmistusteknologiat yleistyvät siten, että MLA-päällysteitä on saatavilla samoilta asfalttiasemilta kuin perinteisiä kuuma-asfaltteja. On kuitenkin otettava

huomioon, että jos MLA-päällysteitä joudutaan kuljettamaan kohteille kauempaa, kuljetuksista aiheutuvat päästöt kasvavat ja MLA:n käyttö ei päästöjen vähentämisen kannalta ole välttämättä hyödyllistä. Tämän tutkimuksen koekohteelle kuljetettiin MLA-massoja asfalttiasemilta, joiden etäisyydet kohteesta olivat noin 21 km ja 67 km. Toisen asfalttiaseman etäisyys oli siis jopa yli kolminkertainen lähempään verrattuna. Päästöjen vähentämiseksi kuljetusmatkojen selvittäminen on siis hyvin tärkeää ja toisaalta sama pätee myös tavallisia KA-massoja tilatessa eli asiaa tulisi harkita myös kilpailutuksessa.

Toistaiseksi MLA-päällysteiden kestävyudessa ei ole ollut havaittuja ongelmia. Jos myöhemmin havaitaan, että MLA-päällysteet joudutaan korvaamaan uudella kulutuskerroksella ennen kuin vastaavat KA-päällysteet, MLA:lla saavutetut päästövähennykset kumoutuvat liian aikaisen päällystyksen aiheuttamilla päästöillä.

6.3 Jatkotutkimukset

Tässä työssä esiteltujen MLA-koekohteiden tutkimuksia kannattaa jatkaa esimerkiksi toteuttamalla uusia HVL- ja jäykkyyskokeita Kallvikintien MLA-koekohteelle sekä vertailukohteille kesän 2016 jälkeen. MLA-päällysteen jäykkyyden tulisi kirjallisuusselvitykseen perustuen kasvaa nopeammin kuin vertailumassan ja vuoden ikäisinä niiden pitäisi vastata toisiaan, mutta esimerkiksi Vuotien uraprofiilimittauksissa havaittu mahdollinen deformaatio ei tue tätä. Tästä syystä jäykkyyskokeita olisi hyvä suorittaa myös Vuotien näytteille, vaikka alkuperäistä jäykkyyttä ei tiedetäkään. Koekohteiden kestävyyttä voitaisiin jatkossa seurata esimerkiksi vaurioinventointien avulla, milloin mahdolliset vauriot havaittaisiin nopeasti niiden syntymisen jälkeen ja niiden sijaintia voitaisiin verrata levityslämpötilamittauksiin.

Ulkomaisissa tutkimuksissa keskitytään usein yhden tai kahden valmistusmenetelmän tutkimiseen laboratoriokokeiden avulla. Tässä tutkimuksessa kaikki kokeet perustuivat tielle levitettyihin päällysteisiin, mutta näytteitä voitaisiin valmistaa myös laboratoriossa asfalttiasemalla valmistetusta massasta kuten joissakin ulkomaisissa tutkimuksissa. Laboratoriossa valmistettujen näytteiden avulla voidaan vähentää joitakin virhetekijöitä kuten esimerkiksi jyräskertojen eroja. Toisaalta laboratorionäytteet eivät milloinkaan vastaa todellista tilannetta eli niiden tueksi voidaan ottaa näytteitä myös levitetystä päällysteestä. Tutkimuksissa kannattaa kuitenkin pyrkiä yksinkertaisiin kokonaisuuksiin esimerkiksi valitsemalla vain yksi valmistusmenetelmä, jonka vaikutuksia selvitetään perusteellisesti.

Uusien koekohteiden suunnittelussa kannattaa ottaa huomioon etenkin mahdollisen vertailukohteen ja MLA-koekohteen yhteensopivuus. Optimitilanteessa asfalttimassojen koostumukset vastaavat toisiaan täysin paitsi MLA-massan valmistusmenetelmän kannalta välttämättömien lisäaineiden osalta. Koostumusten erojen minimointi voi kuitenkin olla mahdollista, jolloin mahdollisten erojen dokumentoinnin tarkeys korostuu. Jos koekohtetta suunniteltaessa havaitaan, että vertailumassan ja MLA-massan välillä on kyseessä olevan tutkimuksen kannalta merkittäviä eroja, ei vertailuosuutta kannata välttämättä edes toteuttaa, koska sen ominaisuudet voivat aiheuttaa virhetulkintoja.

Helsingissä levitettävien AB-massojen asfalttirouhepitoisuus on tyypillisesti 50 %, mutta kirjallisuusselvityksen yhteydessä havaittiin, että ulkomailla MLA-massojen asfalttirouhepitoisuudet olivat usein pienempiä. Asfalttipäällysteiden kierrätyksellä on kuitenkin merkittävä vaikutus ympäristöön, minkä vuoksi MLA-massojen asfalttirouhepitoisuuden nostami-

sen vaikutuksia tulisi selvittää. Lisäksi MLA-massoissa käytettävillä lisäaineilla voi olla vaikutuksia MLA-päällysteen kierrätettävyyteen eli laajemman käytön kannalta on keskeistä varmistaa, että päällysteet voidaan myös kierrättää niiden elinkaaren lopussa.

Suomessa valmistettavien MLA-massojen päästövähennyksistä ei ole toistaiseksi saatavilla mittaustuloksia. Kuten aiemmin todettiin, päästöjen mittaaminen asfalttiasemalla voi olla lähes mahdotonta, mutta esimerkiksi seuraamalla polttoaineenkulutusta voidaan päästövähennyksiä laskea melko tarkasti. Tarkimman lopputuloksen saavuttamiseksi mahdollisten päästövähennysten määrää kannattaa kuitenkin tutkia molempien mittauksien perusteella, jos se vain on mahdollista.

Mahdollinen päästöjen ja polttoaineenkulutuksen mittaaminen asfalttiasemalla voi kuitenkin olla virhealtista, sillä esimerkiksi mittalaitteen sijainti asemalla vaikuttaa tuloksiin merkittävästi. Päästöjen osalta mittapisteitä tulisi olla useita, mutta keskeisin sijainti on niin kutsuttu ”in-point”-piste, jonka kautta valtaosa asfalttiaseman päästöistä kulkee ilmakehään. Myös polttoaineenkulutuksen mittauksessa voi tapahtua virheitä, sillä esimerkiksi osa polttoaineesta voi jäädä palamatta virheellisten polttimeiden säätöjen takia.

Asfalttiasemalla kannattaa tästä syystä varmistaa, että polttoaine palaa täydellisesti valmistettaessa mitä tahansa asfalttimassaa, mikä vähentää polttoaineenkulutusta sekä esimerkiksi hiilimonoksidipäästöjä, kuten kirjallisuusselvityksessä havaittiin. Lisäksi käytettävän kiviaineksen vesipitoisuus kannattaa määrittää säännöllisin väliajoin, koska vesipitoisuudella on merkittävä vaikutus kiviaineksen kuivaamiseen vaadittavaan energiaan.

MLA-päällysteiden yleistyminen vaatinee vielä huomattavasti aikaa ja tutkimuksia sekä ennen kaikkea avoimuutta mittaus- ja tutkimustulosten jakamisessa, vaikka MLA-massojen tarkat valmistusmenetelmät pidettäisiinkin yrityssalaisuuksina.

7 Yhteenveto

Matalalämpöasfaltilla tarkoitetaan asfalttimassaa, joka valmistetaan perinteistä asfalttimassaa matalammassa lämpötilassa, jolloin polttoaineenkulutus sekä valmistuksesta aiheutuvien kasvihuonepäästöjen määrä laskevat. Perinteistä kuuma-asfalttia vastaavan asfalttimassan valmistaminen matalammassa lämpötilassa vaatii kuitenkin, että sideainetta muunnellaan pysyvästi tai väliaikaisesti siten, että sekoitukseen sopiva viskositeetti saavutetaan alemmassa lämpötilassa. Sideaineen muuntelu edellyttää kuitenkin, että ominaisuudet vastaavat perinteisissä asfalttimassoissa käytettyjen sideaineiden ominaisuuksia käyttölämpötiloissa.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia matalalämpöasfaltin kestävyyttä verrattuna perinteiseen asfalttibetoniin Helsingissä sijaitsevien koekohteiden avulla sekä selvittää MLA:n mahdollisten päästövähennysten merkitystä Helsingin ilmastotavoitteessa. Lisäksi tavoitteena oli arvioida kompensoivatko päästövähennykset mahdollista kestävyuden alentumista sekä esittää suositus matalalämpöasfalttien käyttömahdollisuuksista.

Käytetyt tutkimusmenetelmät olivat kirjallisuusselvitys, koekohteiden kenttä- ja laboratoriokokeet sekä päästövähennyslaskenta. Työn kirjallisuusselvityksessä perehdyttiin matalalämpöasfaltteihin ja niiden toimintaperiaatteisiin yleisesti, ulkomaisiin MLA:n valmistusmenetelmiin sekä niiden vaikutuksiin ja mahdollisiin ongelmiin. Kirjallisuusselvityksen yhteydessä havaittiin, että aihe on erittäin laaja useiden erilaisten sideainetta muuntelevien valmistusmenetelmien vuoksi. Valmistusmenetelmillä on hyvin erilaisia vaikutuksia niin sideaineeseen kuin valmistettuun asfalttimassaan, minkä vuoksi vaikutusten arviointi on usein tehtävä tapauskohtaisesti. Valmistusmenetelmät voidaan jakaa kolmeen luokkaan, jotka ovat orgaanisten ja kemiallisten lisäaineiden käyttö sekä bitumin vaahdotus. Vaahdotusmenetelmä taas voidaan jakaa kahteen alaluokkaan eli vesi-injektioon perustuviin prosesseihin ja vettä sisältävillä raaka- tai lisäaineilla toteutettuihin prosesseihin.

Työssä tutkittavia MLA-koekohteita oli kolme, joissa kaikissa oli eri urakoitsijan AB 22 MLA -päällyste. Koekohteista yksi sijaitsi Kallvikintiellä ja kaksi Vuotiellä, jossa oli tutkimusten tukena myös AB 22 -vertailuosuus, joka sijaitsi MLA-koekohteiden välittömässä läheisyydessä. Koekohteiden tutkimukset perustuivat pääosin levityslämpötilamittauksiin sekä poranäytteisiin, joita tutkittiin laboratoriossa. Poranäytteiden perusteella tutkittiin ensisijaisesti levityslämpötilojen vaikutuksia päällysteiden tiivistymiseen tyhjätilan avulla. Poranäytteitä käytettiin lisäksi jaksollisiin virumis-, nastarengaskulumis, halkaisuvetolujuus ja jäykkyyskokeisiin. MLA-päällysteiden kestävyyttä arvioitiin myös puolivuositain tehtyjen uraprofiilimittausten perusteella.

Koekohteiden tutkimuksissa havaittiin seuraavia asioita:

- Levityslämpötilat vaihtelivat 77 – 165 °C:n välillä, mikä viittaa myös merkittävään sekoituslämpötilojen vaihteluun.
- MLA-koekohteilla ei havaittu poikkeavaa urautumista.
 - Kiviainesten erot olivat merkittävin muuttuja nastarengasurautumisen kannalta. Prall-kokeet tukivat havaintoa.
 - Koekohteiden deformaatio oli lähes vertailupäällystettä vastaavaa. Creep-kokeissa MLA-päällysteillä ei ollut selviä eroja.
- Levityslämpötila korreloi tyhjätilan kanssa, mutta korrelaatiokerroin on usein melko pieni mittauksien epätarkkuuden takia.
 - MLA-päällysteet tiivistyivät matalissakin lämpötiloissa riittävän hyvin.

- MLA-päällysteen HVL- ja jäykkyystulokset olivat pienempiä kuin vertailtavien kuuma-asfalttien.
 - Kestävyystarkastelun kannalta tulokset olivat kuitenkin hyväksyttäviä.
- Kohteelta otetuissa MLA-massanäytteissä ei havaittu merkittävää määrää kosteutta.
 - Sekoitustilämpötila oli kuitenkin toisinaan melko korkea.

Mahdollisten päästövähennysten arviointi toteutettiin päästövähennyslaskelmien perusteella, joissa lähtötietoina käytettiin keskimääräistä Helsingissä vuosittain levitettävien AB-massojen tonnimäärää, kirjallisuusselvityksessä havaittuja polttoaineenkulutuksia ja sen vähennyksiä sekä kevyen polttoöljyn kirjallisuusarvoja. Päästövähennyslaskennassa havaittiin, että MLA-massoilla saavutettavien päästövähennysten vaikutus on marginaalinen Helsingin kaupungin ilmastotavoitteessa. Vähäinenkin alennus kasvihuonepäästöjen määrässä on kuitenkin askel kohti Helsingin kaupungin tavoitetta olla hiilineutraali kaupunki vuoteen 2050 mennessä. Toisaalta MLA-massojen hinta on toistaiseksi niin korkea, että päästöjen vähentäminen niiden avulla ei ole kannattavaa, mutta tilanne voi muuttua, jos MLA-päällysteet yleistyvät ja niiden hinta laskee.

Työn yhteydessä havaittiin, että aiheesta ei ole vakiintunutta sanastoa Suomessa ja matalalämpöasfalteista puhutaan useilla eri nimillä. Tästä syystä työssä selvitettiin ulkomailla käytössä olevien valmistustilämpötilaan perustuvien luokkien jaotteluperiaatteet, joiden pohjalta laadittiin ehdotus suomenkielisten vastineiden ja niiden luokittelun pääperiaatteista. Ehdotettu asfalttimassojen valmistustilämpötilaan ja -menetelmään perustuva luokittelu on esitetty taulukossa 21 sivulla 74 ja sen käyttöönottoa suositellaan myös Asfalttinormeihin.

Lähdeluettelo

- Astec Industries 2016. Warm Mix Systems. Viitattu: 2.3.2016, saatavissa: <http://www.astecinc.com/products/liquid-additives/warm-mix-systems.html>
- Bonaquist, R. F. 2011. Mix design practices for warm mix asphalt (Vol. 691). Transportation Research Board.
- Chowdhury, A., & Button, J. W. 2008. A Review of Warm Mix Asphalt. Texas Transportation Institute, Texas A&M University System.
- Colas. 2016. 3E Asphalt concrete. Viitattu 9.3.2016, saatavissa: <http://www.colas.com/en/press-media/media/3e-asphalt-concrete>
- Corrigan, M. 2015. Warm Mix Technologies and Research, U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Päivitetty 19.10.2015, viitattu 24.2.2016, saatavissa: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R. & Yeaton, B. 2008. Warm-Mix Asphalt: European Practice. American Trade Initiatives. Washington DC, U.S. Department of Transportation
- Edwards, Y. 2005. Influence of Waxes on Bitumen and Asphalt Concrete Mixture Performance. Doctoral thesis. KTH, School of Architecture and the Built Environment (ABE), Civil and Architectural Engineering, Highway and Railway Engineering.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y. & Isacson, U. 2006. Influence of Commercial Waxes and Polyphosphoric Acid on Bitumen and Asphalt Concrete Performance at Low and Medium Temperatures. Journal of Materials and Structures, Volume 39, No. 7, Springer Netherlands.
- Engineered Additives LLC. 2016. Asphalt Performance Modifiers and Additives, B. Warm-Mix and High RAP Additives. Viitattu 10.3.2016, saatavissa: http://www.engineeredadditives.com/our_products.html
- Epps Martin, A., Arambula, E., Yin, F., Garcia Cucalon, L., Chowdhury, A., Lytton, R., Epps, J., Estakhri, C. & Park, E. S. 2014. Evaluation of the Moisture Susceptibility of WMA Technologies. NCHRP Report 763. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). 2014. The use of Warm Mix Asphalt EAPA – Position Paper
- FAV, The Norwegian Asphalt and Road Contracting Association. 2011. Norwegian WMA project – Low Temperature Asphalt 2011, Main report.
- Frank, B., Prowell, B. D., Hurley, G. C. & West, R. C. 2011. Warm mix asphalt (WMA) emission reductions and energy savings. In 2nd International Warm-Mix Conference, St. Louis, MO.

Google Maps -palvelu. 2016. Internet sivut. <https://www.google.fi/maps>

Hajj, E. Y., & Cortez, E. M. 2011. Evaluation Of The Cecabase Warm-Mix Additive. University Of Nevada Reno, in association with CECA Arkema Group, Nevada.

Helsingin kaupunki. 2010. Energiansäästöneuvottelukunta, Kestävän energiankäytön toimenpideohjelma, Kaupunginjohtajien energia- ja ilmastopöytäkirja. Viitattu 19.1.2016, saatavissa: <http://www.energiatohokashelsinki.fi/tiedostot/seap-tiivistelma-ja-toimenpiteet.pdf>

Helsingin kaupunki. 2012. Helsingin kaupungin ympäristöpolitiikka. Saatavissa: <http://www.hel.fi/static/ymk/esitteet/ymparistopolitiikka.pdf>

Helsingin kaupunki 2013 Strategiaohjelma 2013–2016. Saatavissa: http://www.hel.fi/static/taske/julkaisut/2013/Strategiaohjelma_2013-2016_Kh_250313.pdf

Helsingin kaupunki. 2014a. Energiansäästöneuvottelukunta, Covenant of Mayors. Viitattu 19.1.2016, saatavissa: <http://www.energiatohokashelsinki.fi/energiatohokkuus/sitoumukset/covenant-of-mayors>

Helsingin kaupunki. 2014b. Helsingin kaupungin ympäristöraportti 2014. Saatavissa: <http://www.hel.fi/static/ymk/yrp/fi/hki-ymparistoraportti-2014.pdf>

Helsingin kaupunki. 2014c. Liikennemäärät Helsingin pääkatuverkossa. Julkaistu 09/2014, viitattu 28.4.2016, saatavissa: <http://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/Liikennesuunnittelu/Liikennetutkimus/Liikennemaarat.pdf>

Helsingin kaupunki. 2015a. Energiansäästöneuvottelukunta, Energiatohokkuussopimukset. Viitattu 19.1.2016, saatavissa: <http://www.energiatohokashelsinki.fi/energiatohokkuus/sitoumukset/et-sopimukset>

Helsingin kaupunki. 2015b. Risteyslaskenta Itäreimarintie-Vuotie. Kaupunkisuunnitteluvirasto, liikennejärjestelmätoimisto.

Helsingin kaupunki. 2016. Karttapalvelu. <http://kartta.hel.fi/>

HINKU-foorumi. 2014. Vähemmän päästöjä asfaltinvalmistuksesta. Julkaistu 20.8.2014, viitattu 11.3.2016, saatavissa: http://www.hinku-foorumi.fi/fi-FI/Yritys/Vahemman_paastoja_asfaltinvalmistuksesta%2831353%29

HSY, Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Johannes Lounasheimo. 2014. Pääkaupunki-seudun ilmastoraportti 2014. Viitattu 19.1.2016, saatavissa: <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/ilmastonmuutos/hillinta/seuranta/Documents/P%C3%A4%C3%A4kaupunkiseudun%20ilmastoraportti%20-%20p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6jen%20kehitys%202014.pptx>

HSY, Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Johannes Lounasheimo. 2015. Pääkaupunki-seudun kasvihuonekaasupäästöjen laskenta, KHK-päästöt 1990 ja 2000–2014. Viitattu

19.1.2016, saatavissa: https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/ilmastonmuutos/hillinta/seuranta/Documents/PKS_kasvihuonekaasupaastot_1990_2000-2014_lopulliset_tiedot_kokonaispaastot.xlsx

Hurley G. C. & Prowell B. D. 2005. Evaluation of Sasobit® for Use in Warm Mix Asphalt, Report NCAT 05-06, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Alabama

Hurley G. C. & Prowell B. D. 2006a. Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 75, Savannah, Georgia

Hurley G. C. & Prowell B. D. 2006b. Evaluation of Evotherm® for use in warm mix asphalt. NCAT Report 06-02.

IPCentral GmbH. 2015a. TMDB Trademark search engine, Trademark: 'WAM'. Viitattu 15.2.2016, saatavissa: <https://tmdb.eu/trademark/001898725/eu/wam>

IPCentral GmbH. 2015b. TMDB Trademark search engine, Trademark: 'LT-Asphalt'. Viitattu 15.2.2016, saatavissa: <https://tmdb.eu/trademark/005011622/eu/lt-asphalt>

Jenkins, K., De Groot, J., van de Ven, M. & Molenaar, A. 1999. Half-warm foamed bitumen treatment, a new process. In 7th Conference on asphalt pavements for Southern Africa (CAPSA 99).

Jones, C., West, R., Julian, G., Taylor, A., Hurley, G. & Kvasnak A. 2011. Evaluation of warm mix asphalt in Walla Walla, Washington. NCAT Report 11-06.

Karjalainen J. 2015. Asfalttiaseman hiilijalanjälki. Opinnäytetyö (AMK). Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka, koneautomaatiotekniikka.

Keches, C. & LeBlanc, A. 2007. Reducing Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Materials. BSc. Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester.

Kristjansdottir, O. 2006. Warm mix asphalt for cold weather paving. Doctoral dissertation. University of Washington.

Kristjansdottir, Ó., Muench, S., Michael, L. & Burke, G. 2007. Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2040, s. 91-99

Larsen, O. R., Moen, Ø., Robertus, C. & Koenders, B. G. 2004. WAM Foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004 – Paper 137

Lehtipuu, E. 1983. Asfalttipäällysteet. Rakentajain Kustannus Oy, Hämeenlinna, 412 s., ISBN 951-676-290-5

Mallick, R. B. & Bergendahl, J. 2009. A laboratory study on CO2 emission from asphalt

binder and its reduction with the use of warm mix asphalt. International Journal of Sustainable Engineering, 2(4), 275-283.

Meeker Equipment Co., Inc. 2016. NYSDOT (New York State Department Of Transportation) overview and guidelines for Meeker Warm Mix System: Overview. Viitattu 3.3.2016, saatavissa: <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/technical-services-repository/details/meeker.pdf>

Middleton, B. & Forfylyow, R. 2009. An Evaluation of Warm Mix Asphalt Produced with the Double Barrel Green Process. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2126. Bituminous materials and mixtures 2009 vol. 1, s. 19-26

Mohammad, L. N., Hassan, M. M., Vallabhu, B. & Kabir, M. S. 2014. Louisiana's Experience with WMA Technologies: Mechanistic, Environmental, and Economic Analysis. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(6).

Monu, Km., Banger, P. & Duggal, A. K. 2015. A review paper on warm mix asphalt technologies. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), e-ISSN: 2395 -0056, p-ISSN: 2395-0072, Volume: 2 Issue: 5, August 2015.

Motiva Oy. 2010. Polttoaineiden lämpöarvot, hyötysuhteet ja hiilidioksidin ominaispäästö-kertoimet sekä energian hinnat. Julkaistu: 19.4.2010, viitattu: 18.4.2016, saatavissa: http://www.motiva.fi/files/3193/Polttoaineiden_lampoarvot_hyotysuhteet_ja_hiilidioksidin_ominaispaastokertoimet_seka_energianhinnat_19042010.pdf

Motiva Oy. 2012. Yksittäisen kohteen CO₂-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet. Julkaistu: 12/2012, viitattu: 18.4.2016, saatavissa: http://www.motiva.fi/files/8886/CO2-laskentaohje_Yksittainen_kohde.pdf

Nevalainen, N. 2014. Diplomityö. Lämpökamera päällystystöiden laadunvarmistuksessa. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka, Tietekniikka.

Newcomb, D. 2006. An Introduction to Warm Mix Asphalt, National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland. Saatavissa: http://www.warmmixasphalt.com/submissions/4_20071125_Introduction_to_Warm-mix_Aspphalt.pdf

Newcomb, D. E., Arambula, E., Yin, F., Zhang, J., Bhasin, A., Li, W. & Arega, Z. 2015. Properties of foamed asphalt for warm mix asphalt applications. No. Project 09-53.

Nynas AB. 2016. The Sustainability Case. Viitattu 9.3.2016, saatavissa: <http://www.nynas.com/Segment/Bitumen-for-paving-applications/UK/Bitumen-for-paving-applications/Nynas-guides/Cold--Semi-Warm-Application-guides/The-Sustainability-Case/>

Paasikangas-Tella, J. 2014. Asfalttia energiaa säästäen. Lemminkäinen asiakaslehti, huhtikuu 2014, s. 4, Viitattu 11.3.2016, saatavissa: <http://www.digipaper.fi/lemminkainen/120612/>

Pavement Interactive. 2008. Superpave Performance Grading. Julkaistu 8.10.2008, viitattu 15.3.2016, saatavissa: <http://www.pavementinteractive.org/article/superpave-performance-grading/>

Pavement Interactive. 2011. Dynamic Shear Rheometer. Julkaistu 21.4.2011, viitattu 16.3.2016, saatavissa: <http://www.pavementinteractive.org/article/dynamic-shear-rheometer/>

Pellinen T. 2004. Conceptual Performance Criteria for Asphalt Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 73, s. 337-366

Pellinen, T., Makowska, M., Olmos, P., Laukkanen, O. V. 2013. Durability of Ring-Road II asphalt pavement, Phase I report on forensic analysis of Ring-Road II pavement distresses. Aalto University, School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Highway Engineering

Perkins, S. 2009. Synthesis of warm mix asphalt paving strategies for use in Montana highway construction. Montana: the state of Montana, department of transportation, November 2009, Final report.

Prowell, B., Hurley, G. & Frank, B. 2012. Warm-Mix Asphalt: Best Practices 3rd Edition National Asphalt Pavement Association (NAPA), Quality Improvement Publication 125, 3rd Edition

Prowell, B., Frank, B., Osborne, L., Kriech, T. & West, R. 2014. Effects of WMA on plant energy and emissions and worker exposures to respirable fumes. National Cooperative Highway Research Program-NCHRP. Washington, DC: TRB.

Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. 2011. Asfalttinormit 2011. Vantaa.

Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. 2013. Asfalttinormit 2011, Lisäykset ja korjaukset 1.1.2013

Rafiee, M. R. & Javid, N. 2015. An Experimental Study on Effect of Nano-Materials On Mixing and Compaction Temperature of Limestone Nature HMA. Current World Environment Vol. 10 (Special Issue 1), Proof (2015)

Raja, V. V., Mahida, S., Mahida, V., Parmar, A., Gayakwad, B. & Mishra, C. B. 2015. Warm Mix Asphalt Chemical Technology – A Review. Journal of International Academic Research for Multidisciplinary, ISSN: 2320-5083, Volume 3, Issue 7, August 2015

Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. & Moreno, F. 2011. Warm mix asphalt: an overview. Journal of Cleaner Production 24 (2012) 76-84

Rubio, M. C., Moreno, F., Martínez-Echevarría, M. J., Martínez, G. & Vázquez, J. M. 2012. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt, Journal of Cleaner Production 41 (2013) 1-6

Rühl, R., & B. Lindemeier, Ed. Progress Report 2006: The German Bitumen Forum. Edition 2 (in English), Heinrich Lauck GmbH, Germany, 2006.

Sasol Wax. 2015. Sasobit Asphalt Technology. Viitattu 23.2.2015, saatavissa: <http://www.sasolwax.us.com/sasobit.html>

SFS-EN 12697-5. 2010. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 21 s.

SFS-EN 12697-6. 2012. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 6: Asfalttinäytteen kappaleitiheyden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 33 s.

SFS-EN 12697-8. 2003. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 8: Asfalttinäytteen tyhjätilan määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 16 s.

SFS-EN 12697-23. 2004. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 23: Asfalttinäytteen halkaisuvetolujuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 22 s.

SFS-EN 12697-26. 2012. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 26: Jäykkyys. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 102 s.

SFS-EN 12697-29. 2003. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 29: Asfalttinäytteen ulkomittojen määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 12 s.

SFS-EN 13108-1:2006 + AC:2008. 2006. Asfalttimassat. Materiaalivaatimukset. Osa 1: Asfalttibetoni. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 37 s.

Skolnik, J., Brooks, M. & Oman, J. 2013. Fuel Usage Factors in Highway and Bridge Construction. NCHRP report 744.

Suomen virallinen tilasto. 2016. Polttoaineluokitus 2016. Julkaistu 5.2.2016, viitattu: 23.4.2016, saatavissa: http://tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Terex Corporation. 2011. Warm Mix Asphalt System. Viitattu 9.3.2016, saatavissa: http://elit.terex.com/assets/ucm03_047487.pdf

Topal, A. & Dokandari, P. 2014. Laboratory Comparison of Aging Characteristics of Warm Mix Asphalts Involving Natural and Synthetic Water Containing Additives. Materials Research, 17(5), 1129-1136.

Van Den Heever, J. 2014. Warm mix asphalt vs. Hot mix asphalt: Flexural stiffness and fatigue life evaluation. Doctoral dissertation, Stellenbosch University.

Vaitkus, A., Cygas, D., Laurinavicius, A. & Perveneckas, Z. 2009. Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4(2), 80-86.

Viman, L. 2010. Uppföljning av vägar utförda med KGO-III-metoden, VTI notat 21-2010, VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute), SE-581 95 Linköping Sweden

VNa 846/2012 Valtioneuvoston asetus asfalttiasemien ympäristönsuojeluvaatimuksista, saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120846>

Von Devivere, M., Barthel, W. & Marchand, J.P. 2011. Warm Asphalt Mixes by Adding Aspha-Min®, a Synthetic Zeolite. In Proceedings of the 48th Annual Convention of the National Asphalt Pavement Association (NAPA) pp. 11-17.

Ympäristöministeriö 2015. CE-merkintä. Viitattu 11.2.2016, saatavissa: <http://www.ym.fi/ce-merkinta>

Zaumanis, M. 2010. Warm mix asphalt Investigation. Master of science thesis, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark.

Liiteluettelo

Liite 1. Matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmiä. 14 sivua.

Liite 2. Kosteusvaurioherkkyystutkimuksen kohteiden yhteenveto sekä tuloksia. 3 sivua.
(Epps Martin ym. 2014)

Liite 3. Vuotien levityslämpötilamittausten linjakartta sekä mittaustulokset. 3 sivua.

Liite 4. Vuotien tyhjätilatutkimusten tulokset. 1 sivu.

Liite 5. Vuotien uraprofiilimittausten tulokset ja urasyvyystulkinta. 6 sivua.

Liite 6. Kallvikintien levityslämpötilamittausten linjakartta sekä mittaustulokset. 3 sivua

Liite 7. Kallvikintien HVL- ja jäykkyyskokeiden tulokset. 2 sivua.

Liite 1. Matalalämpöasfalttien valmistusmenetelmiä

Taulukossa on esitetty kirjallisuusselvityksen yhteydessä havaittuja valmistusmenetelmiä sekä niille ilmoitettuja valmistuslämpötiloja tai valmistuslämpötilojen eroja verrattuina vastaavaan kuuma-asfalttiin. Taulukossa on myös esitetty valmistajia, joiden tuotteisiin kyseessä olevat valmistusprosessit tai lisäaineet kuuluvat. Lisäksi taulukon ”Selite ja lisähuomiot” -sarakkeessa on selostettu prosessin tai tuotteen pääasiallinen toimintatapa hyvin tiivistetysti. Menetelmien tarkemmat selostukset ovat esitetty taulukon jälkeen.

Nimi (aikaisempi nimi)	Valmistaja	Selite ja lisähuomiot	ΔT_{KA-MLA} (°C)	$T_{valmistus}$ (°C)
2-Phase Mixing Method	V	1/3 pehmeää ja 2/3 kovempaa si-deainetta, perustuu KGO-menetelmään (5)	10 - 30 °C (5)	
3E LT (Ecoflex)	O	Colas	Patentoitu prosessi, ei tietoa saata-villa. Nyk. 3E Asphalt concrete?	30 - 40 °C (1,2) 40 - 45 °C (14)
Accu-Shear	V	Stansteel Asphalt Plant Products	Vaahdotus kolloidimyllyssä, veden lisäksi voidaan syöttää muita lisäai-neita (9)	
Advera WMA	V	PQ Corporation	Zeoliitti Heikompi absorptio (12)	20 - 30 °C (1) 10 - 30 °C (2) 28 - 39 °C (3) 30 °C (5) 28 °C (9) 130 - 170 °C * (1) 130 - 145 °C (5) 120 °C (19)
AQUABlack WMA	V	Maxam Equip-ment, Inc.	Vaahdotus korkeapaineisella vesi-injektiolla (9)	k 28 °C (10) k 135 °C (10)
AquaFoam	V	AquaFoam, LLC	Vaahdotus, kaksi suutinta kohtisuo-rassa toisiinsa nähden (9)	
Asphaltan A & Romonta N	O	Romonta GmbH	Montaanivahoja valuasfalteille (13)	20 °C (13)
Asphaltan-B	O	Romonta GmbH	Montaanivahan ja rasvahappoami-dien yhdistelmä, verrattavissa FT-vahoihin (8)	20 - 30 °C (1,2) 130 - 170 °C * (1)
Aspha-Min	V	Aspha-min GmbH	Zeoliitti ≈ Advera WMA -> Heikompi absorb-tio?	20 - 30 °C (1,2) 30 °C (3,5) 130 - 170 °C * (1) 130 - 145 °C (5)
Cecabase RT	K	Arkema Group	Tensidiseos, vesivapaa, alentaa pin-tajännitystä ja toimii "voiteluai-neena" (9)	30 °C (2) 40 °C (9) 102 °C (3)
Double Barrel Green	V	Astec Industries Inc.	Useita vaahdotuskammioita. Double Barrel® yksikköön asennet-tava, muihin asemiin vastaava tuote Green Pac™ (9)	116 - 135 °C (1,2) 124 °C (3) 121 - 135 °C (9)
Eco-Foam II (Static Inline Vortex Mixer)	V	AESCO/MAD-SEN	Vaahdotuslaittесто, suuri sideai-neen ja veden kosketuspinta-ala (9)	
Evotherm 3G (REVIX)	K	WestRock	Vedetön lisäaine, ei vaadi muutok-sia asf.asemaan (9) Useita erilaisia aineita mm. tensi-dejä, vahoja, polymeerejä (8)	15 - 25 °C (2) 15 - 30 °C (2) 33 - 44 °C (8) 110 °C ** (1)
Evotherm ET / DAT	K	WestRock	ET = Valmis emulsio, n. 70 p-% si-deainetta (9) DAT = Vesi + lisäaine, veden määrä vaikuttaa valmistuslämpötilaan (9)	85 - 115 °C (1,2,9) 91 °C (3) 115 °C (19)
Hydrogreen® S (BituTech PER, BituTech RAP®, Astech)	O	Engineered Ad-ditives LLC	Kasvipohjainen elvytin, jota voidaan käyttää myös MLA:n valmistukseen.	28 °C (21)
HyperTherm / QualiTherm (Iterlow-T)	K	Coco Asphalt Engineering / QPR	Rasvahappoon perustuva kemialli-nen lisäaine, vain pieniä vaikutuksia sideaineen reologisiin ominaisuuksiin (9)	120 °C (2,9)

KGO-III	V		Osittain kostea kiviaines, mahdollisuus alentaa sideainepit. noin 0,5 % (4)	30 °C (4)	
LEA Low Emission Asphalt	V+K	McConnaughay Technologies	Karkea kiviaines kuivattu, loput kostea. Sideaine vaahtoutuu kostean kiviaineksen lisäyksessä. Käytetään kem. lisäainetta	PMLA Kivaines n. 20 °C matalampi (9)	90 °C (2) < 100 °C (9)
LEA Low Energy Asphalt (EBE, EBT)	V+K	LEA-CO	Karkea kiviaines kuivattu, loput kostea. Sideaine vaahtoutuu kostean kiviaineksen lisäyksessä. (Käytetään kem. lisäainetta)	PMLA Kivaines n. 20 °C matalampi (1)	< 100 °C (1,2)
LEAB	V+O	BAM	Vaahdotus + amiinipohjainen orgaaninen lisäaine, jonka tarkoituksena on parantaa vaahdon kestävyyttä ja tartuntaa (1)	PMLA	90 °C (1,2)
LEADCAP	O	Kumho Petrochemical Co.	Vaha + tartuke + lisäaine, joka hallitsee vahan kiteytymistä estäen mahd. halkeilua kylmissä olosuhteissa (9)	30 °C (9)	
Licomont BS 100	O	Clariant International Ltd	Rasvahappoamidi, vaikutukset verrattavissa muihin orgaanisiin lisäaineisiin (1)	20 - 30 °C (1,2)	130 - 170 °C * (1)
LT Asphalt		Nynas AB	Vaahdotettu sideaine + vettä imevä hienoaaines, joka säilyttää ja hallitsee kosteutta (1)	PMLA	90 °C (1,2)
Meeker Warm Mix	V	Meeker Equipment Co., Inc	Yksinkertainen vaahdotuslaitteisto (9)		121 - 135 °C (11)
Nybit PX	O/K	Nynas AB	Valmis sideaine MLA:n valmistukseen (16)	40 °C (16)	
Nypave PX	O/K	Nynas AB	Valmis sideaine MLA:n valmistukseen (16)	30 °C (16)	
Rediset LQ	K	AkzoNobel Surfactants	Rediset WMX nestemäinen versio (9)		
Rediset WMX	K	AkzoNobel Surfactants	Kemiallinen lisäaine, pelletti, ei vaadi muutoksia asf. asemaan. (9)	30 °C (2) 33 °C (3,8,9) 40 °C (24)	127 °C (3)
Sasobit	O	Sasol Wax	FT-vaha, vähäisempi haurastuminen kuin parafiinivahoilla (7)	20 - 30 °C (1,2) 10 - 30 °C (6) 18 - 54 °C (7)	130 - 170 °C * (1) 113 °C (3)
Sasoflex	O+K	Sasol Wax	Sasobit & SBS (7)		
SonneWarmix (AD-RAP, ECOBIT, Sonneborn AR)	O	Sonneborn, Inc.	Vaha, parafiinisten hiilivetyjen seos (9)	28 °C (9)	
Sübit	O	GKG MINERAL-OEL HANDEL GMBH & CO KG	Sideaine + Licomont BS 100 (1)	20 - 30 °C (1)	130 - 170 °C * (1)
Terex WMA		Terex Roadbuilding	Vaahdotus yksittäisessä kammiossa (9)	32 °C (17)	130 °C (19)
Thiopave (SEAM Sulfur Extended Asphalt Modifier)	O	Shell Sulphur Solutions	Rikin ja orgaanisen lisäaineen yhdistelmä, korvaa jopa 25 til-% sideaineesta, voi muodostaa haitallisia määriä H ₂ S ja SO ₂ korkeissa lämpötiloissa (1)		> 120 °C (9) 125 - 135 °C (9) 135 - 145 °C (18)
Tri-Mix Warm Mix Injection	V	Tarmac International, Inc.	Vaahdotus, 2 suutinta, korkea paine, jopa 4 p-% vettä (9)		
Ultrafoam GX2 (Green Machine)	V	Gencor Industries, Inc.	Vaahdotuslaitteisto, ei vaadi erillistä sekoitinta, tasainen sideaineen paine (9)	k 25 °C (15)	k 129 °C (15)
WAM Foam	V	Kolo Veidekke & Shell	Kiviaines peitetään pehmeällä sideaineella ja sen jälkeen lisätään vaahdotettu kovempi sideaine (20)		110 - 120 °C (1) 100 - 120 °C (2) 125 - 135 °C (24)
ZycoTherm	K	Zydex Industry	Nanoteknologiaan perustuva pii- ja hiilipohjainen synteettinen lisäaine, jonka toiminta perustuu kemiallisiin sidoksiin. Kiviaineksen piipitoisuus vaikuttaa huomattavasti. (23).	5 °C *** (23)	95 - 120 °C (22)

V = Vaahdotusmenetelmä

O = Orgaaninen lisäaine

K = Kemiallinen lisäaine

k = koekohde

* Saksalainen ohjearvo, vaihtelee bitumilaadun mukaan

** Mathy Construction Dilute surfactant = Evotherm 3G

*** MLA & KA testimassojen tyhjätilan perusteella, kalkkikivi

1: D'Angelo ym. 2008

2: Rubio ym. 2011

3: Perkins 2009

4: Viman 2010

5: EAPA 2005

6: Corrigan 2015

7: Hurley & Prowell 2005

8: Chowdhury & Button 2008

9: Prowell ym. 2012

10: Jones ym. 2011

11: Meeker Equipment 2016

12: PQ Corporation 2012

13: Zaumanis 2010

14: Colas 2016

15: Kvasnak ym. 2010

16: Nynas AB 2016

17: Terex Corporation 2011

18: Van Den Heever 2014

19: Vaitkus ym. 2009

20: Larsen ym. 2004

21: Engineered Additives LLC 2016

22: Raja ym. 2015

23: Rafiee & Javid 2015

24: FAV 2011

Vesi-injektiolla toteutettuja vaahdotusprosesseja

Accu-Shear

Accu-Shear vaahdotusmenetelmässä asfalttiasemaan asennetaan erillinen kuvassa 57 esitetty laitteisto, jonka avulla sideainelinjaan voidaan syöttää samanaikaisesti vettä, kemiallisia lisäaineita tai muita nestemäisiä lisäaineita. Laitteiston toiminta perustuu muuttuvanopeuksiseen kolloidimyllyyn, jolla ainesosat saadaan mekaanisesti sekoittumaan kuten emulsioprosessissa. Myllyn muuttuvanopeuksisen moottorin ansiosta sideaine voidaan myös vaahdottaa dynaamisesti, mikä pidentää laitevalmistajan mukaan vaahdon käyttöikää. Hienostuneen prosessin syystä asfalttimassan koevalmistus laboratoriossa voi olla hankalaa, joten massan testaamista varten on syytä valmistaa koe-erä asfalttiasemalla. (Prowell ym. 2012).

Laitteisto vaatii luonnollisesti investoinnin sekä asennuksen asfalttiasemaan, jossa se liitetään osaksi valmistusjärjestelmää. Accu-Shear laitteisto on myös lähes huoltovapaa ja se voidaan ohittaa kokonaan valmistettaessa perinteistä asfalttimassa. Valmistajan mukaan laitteistoja on asennettu asfalttiasemiin Yhdysvalloissa ja Kanadassa ja ne toimivat luotettavasti päivittäisessä käytössä. (Prowell ym. 2012). Valmistuslämpötilan alentaminen vaihtelee esimerkiksi käytettävien lisäaineiden mukaan.



Kuva 57. Accu-Shear laitteisto ja nestemäisten lisäaineiden syöttölaitteita (Muokattu lähteestä Prowell ym. 2012).

AQUABlack® WMA

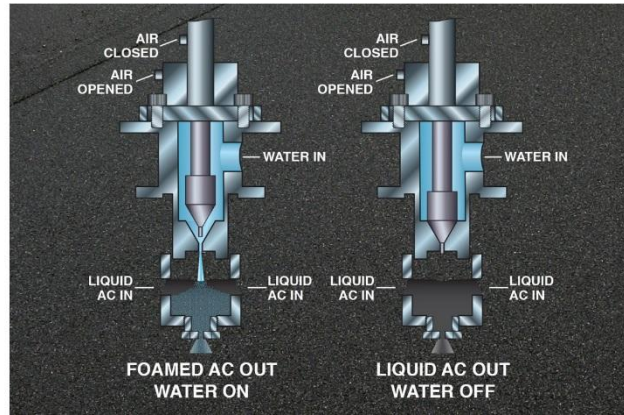
AQUABlack® WMA on vesi-injektioon perustuva vaahdotusmenetelmä, jossa käytetään niin kutsuttua MicroBubble-teknologiaa. Teknologian tarkoituksena on muodostaa sideaineeseen hyvin pieniä kuplia käyttämällä hyvin korkeaa, jopa lähes 7 MPa:n, vedenpainetta. Menetelmässä syntyvien niin kutsuttujen mikrokuplien on sanottu kestävän asfalttimassassa pidempään ja siten jatkavan sen työstettävyyttä. Laitteisto voidaan asentaa kaiken tyyppiin asfalttiasemiin sideaineen syöttölinjaan juuri ennen sideaineen lisäämistä sekoitustilaan. Syötettävän veden määrää voidaan valvoa ja ohjata asfalttiaseman ohjauskeskuksesta. (Prowell ym. 2012). Yhdysvalloissa tehdyille koekohteelle valmistettiin vuonna 2010 MLA:ta AQUABlack® WMA teknologiaa hyödyntäen. Koekohteen MLA:n valmistuslämpötila oli noin 135 °C ja vertailuosuudella käytetyn KA:n valmistuslämpötila oli puolestaan noin 163 °C. Valmistuksessa vettä lisättiin noin 2,5 p-% sideaineesta, mikä vastaa noin 0,1 p-% koko asfalttimassasta. Tutkimuksessa ei havaittu ongelmia MLA-päällysteen valmistuksessa eikä levityksessä tai suurina eroavaisuuksia MLA:n ja KA:n välillä, mutta esimerkiksi väsymiskestävyyden osalta MLA:lle saatiin parempia arvoja. (Jones ym. 2011).

AquaFoam®

AquaFoam®-prosessin toiminta perustuu kahteen kohtisuorassa toisiinsa nähden olevaan tasosuuttimeen, joilla vesi syötetään sideainelinjaan. Suuttimissa on yksisuuntainen venttiili, joka estää sideaineen pääsyn vesijärjestelmään. Suutinyksikkö asennetaan sideainelinjaan juuri ennen sideaineen syöttöä sekoitustilaan. Suutinyksikköön vesi syöteään pumpulla, joka sijaitsee erillisellä alustalla hallintalaitteiston yhteydessä. Veden määräksi suositellaan noin 1,5 p-% koko asfalttimassasta, mutta myös suurempia määriä voidaan käyttää jäykemmille seoksille. (Prowell ym. 2012).

Double Barrel® Green

Double Barrel® on Astec Industries, Inc yrityksen valmistama kuivausrumpu ja sekoitusyksikkö, johon yritys on kehittänyt Double Barrel® Green vaahdotusprosessin. Prosessi perustuu sideaineen vaahdotukseen usean vaahdotuskammion sisällä, joissa kaikissa on oma vesisuutin. Kuvassa 58 on esitetty sideaineen vaahdotusjärjestelmä sekä sen suuttimien toiminta. Suuttimet voidaan myös sulkea, jolloin järjestelmällä voidaan valmistaa tavallista kuuma-asfalttia. (Prowell ym. 2012). Veden syöttöä hallitaan valmistusnopeuden mukaan tietokoneavusteisesti, mutta tyypillisesti syötettävän veden määrä on noin 0,05 p-% koko massasta. Prosessissa voidaan käyttää esimerkiksi tartukkeita, mutta se ei vaadi lisäaineita vaahdotuksessa tai siten myöskään MLA:n valmistuksessa. Valmistuslämpötila prosessissa on tyypillisesti 135 °C, mutta se voi vaihdella noin 116 – 135 °C välillä (D'Angelo ym. 2008). Double Barrel® Green on maailmalla hyvin yleisesti käytetty vaahdotusprosessi. Muiden valmistajien ja muun tyyppisillä asfalttiasemilla voidaan käyttää samaan teknologiaan perustuvaa Green Pac™ -järjestelmää, joka ei kuitenkaan ole yhtä suosittu kuin Double Barrel® Green. (Prowell ym. 2012).



Kuva 58. Double Barrel® Green sideaineen vaahdotusyksikkö ja sen suuttimien toiminta (Astec Industries 2016).

Eco-Foam II (Static Inline Vortex Mixer)

Eco-Foam II -menetelmässä sideainelinjaan asennetaan kuvassa 59 esitelty vaahdotusyksikkö, jossa sideaine kulkee kuristimen läpi, mikä nostaa sen nopeutta. Kuristimen jälkeen sideaineeseen syötetään vettä noin 1 – 2 p-% sideaineen massasta sekä aiheutetaan pyörteitä esteiden avulla, mikä edistää sideaineen ja veden kosketuspinta-alaa sekä siten myös vaahdotumista. Vaahdotusyksikön avulla sideaineeseen voidaan syöttää myös muita nestemäisiä lisäaineita kuten tartukkeita tai muita MLA:n valmistuksessa käytettäviä lisäaineita. Vaahdotusyksikön lisäksi asfalttiasemalle asennetaan vesipumppu ja hallintayksikkö, jonka ohjaus voidaan myös liittää osaksi asfalttiaseman aikaisempaa järjestelmää. (Prowell ym. 2012).



Kuva 59. Eco-Foam II vaahdotusyksikkö (Prowell ym. 2012).

LT Asphalt®

Nynas AB:n LT Asphalt® on prosessi, jossa käytetään vaahdotetun sideaineen lisäksi vettä imevää hienoaainesta, jonka tarkoituksena on säilyttää ja hallita vaahdotuksen kosteutta. Menetelmässä kiviaines lämmitetään vain 90 °C:n lämpötilaan ja sen jälkeen lisätään vaahdotettu sideaine ja hienoaines. (D'Angelo ym. 2008). Kyseessä on siis PMLA-massa. Nynas AB markkinoi myös MLA:n valmistukseen kehitettyjä sideaineita Nypave PX ja Nybit PX, joiden avulla valmistajan mukaan voidaan alentaa valmistuslämpötiloja jopa 30 tai 40 °C (Nynas AB 2016).

Meeker Warm Mix

Kuvassa 60 esitetty Meeker Warm Mix on yksinkertainen sideaineen vaahdotuslaitteisto, joka asennetaan sideainelinjaan kuten muutkin vastaavat tuotteet. Se kehitettiin alun perin käytettäväksi annostyypisillä asfalttiasemilla Yhdysvaltojen koillisosassa. Menetelmässä putkessa kulkevan sideaineen sekaan syötetään vettä, minkä jälkeen sideaine vaahdotuu putken sisällä. Vaahdotusyksikön lisäksi asfalttiasemalle tarvitaan myös vesipumppu ja hallintalaitteisto. (Prowell ym. 2012). Valmistajan mukaan lisättävä vesimäärä vaihtelee 1,25 – 3 p-% välillä sideaineesta ja valmistuslämpötila vaihtelee noin 121 – 135 °C välillä (Meeker Equipment 2016).



Kuva 60. Meeker Warm mix -vaahdotuslaitteisto (Prowell ym. 2012).

Terex® WMA

Terex® WMA -menetelmässä sideaine vaahdotetaan patentoidussa vaahdotuskammiossa. Menetelmän on sanottu saavan aikaan tasalaatuista sideaineen ja veden seosta millä tahansa valmistusnopeudella. Järjestelmässä ei ole vesipumpun ja -mittarin lisäksi mitään liikkuvia osia. (Prowell ym. 2012). Laitteiston valmistajan mukaan valmistuslämpötilaa voidaan laskea jopa 32 °C (Terex Corporation 2011).

Tri-Mix Warm Mix Injection

Tri-Mix Warm Mix Injection -vaahdotusprosessi perustuu veden syöttämiseen sideaineen sekaan kahden vastakkain asetetun suuttimen läpi korkealla paineella. Sideaine ja vesi kulkevat syötön jälkeen pysyvän sekoittimen läpi, mikä mahdollistaa myös nestemäisten lisäaineiden käytön vaahdotuksen lisäksi. Järjestelmän vesipumppu ja hallintalaitteisto sijaitsee erillisellä alustalla ja sitä voidaan hallita täysin manuaalisesti, internetin välityksellä tai täysin tietokoneen avulla. Järjestelmä vaatii myös paineilimaliitännän, jota käytetään tukkeumien poistoon, kun vettä tai lisäaineita ei syötä sideaineen sekaan. Prosessin avulla sideaineen sekaan voidaan syöttää jopa 4 p-% vettä. (Prowell ym. 2012).

Ultrafoam GX2 (Green Machine)

Ultrafoam GX2 on toisen sukupolven laitteisto, joka perustuu saman valmistajan Ultrafoam GX WMA järjestelmään. Laitteisto käyttää hyödyksi sideaineen syöttölinjan energiaa vaahdotusprosessissa eli se ei vaadi erillistä koneellista sekoitinta. Vaahdotusprosessissa vesi syötetään sideainevirran keskelle jousikuormitetun suuttimen läpi, joka aukeaa vedenpaineella. Prosessissa käytetään vettä noin 1,25 – 2 p-% sideaineen massasta. Sideaine puolestaan virtaa kalvoventtiilin läpi, mikä pitää sideaineen paineen tasaisena, mikä taas ylläpitää sideaineen ja veden haluttua suhdetta. Järjestelmän on myös sanottu saavan aikaan pienem-

piä höyrykuplia yhtäjaksoisemman vaahtoutumisen edistämiseksi. Prosessiin tarvitaan vaahtotusyksikön lisäksi erillinen hallintalaitteisto kuten muissa vesi-injektioon perustuvissa vaahtotusmenetelmissä. (Prowell ym. 2012).

Yhdysvalloissa 2010 tehdyssä tutkimuksessa vertailtiin Ultrafoam GX -prosessilla valmistettua sekä perinteistä KA-massaa, joiden ainoa ero oli vaahtotusprosessi eli valmistuslämpötilan alentaminen ja veden lisääminen sideaineen sekaan. Tutkimusta varten valmistetun MLA:n tavoitevalmistuslämpötila oli 129 °C ja KA:n puolestaan 154 °C, mikä tarkoittaa 25 °C:n alennusta. Tutkimuksen laboratoriokokeiden perusteella havaittiin kuitenkin, että valmistettu MLA ei yleisesti ottaen vastannut KA:n ominaisuuksia. (Kvasnak ym. 2010).

WAM® Foam

Kolo Veidekke ja Shell kehittivät 1990-luvun puolivälissä WAM® Foam -vaahtotusprosessin, joka esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 2000 (Larsen ym. 2004). Prosessi perustuu 2-phase mixing -menetelmään eli siinä käytetään kahta eri laatuista sideainetta, jotka lisätään eri vaiheissa (EAPA 2005). Prosessissa kiviaineksen sekaan ensimmäisenä syötettävä pehmeä sideaine valitaan siten, että sen avulla voidaan peittää kiviaines 100 °C:n lämpötilassa. Kovempi sideaine syötetään kiviaineksen peittymisen jälkeen, mutta 2-phase mixing -menetelmästä poiketen se vaahtotetaan veden avulla ennen sekoitusta. Tyypillisesti kovemman sideaineen luokitus vaihtelee 10/20:n ja 70/100:n välillä. Lopullisen sideaineen tunkeuma-luokitus saadaan halutuksi muuttamalla sideaineiden suhdetta tai kovemman sideaineen luokkaa. (Larsen ym. 2004). Pehmeän sideaineen osuus on tyypillisesti noin 20 – 30 % ja halutun tunkeuman saavuttamiseksi suositellaan mielummin sideaineluokkien muuttamista, jotta pehmeää sideainetta voidaan lisätä riittävästi. Pehmeän sideaineen sekaan voidaan tarvittaessa lisätä myös tartukkeita. Kovemman sideaineen vaahtotuksessa käytetään yleensä noin 2 – 5 p-% vettä kovemman sideaineen massasta. (Prowell ym. 2012).

Prosessi vaatii muutoksia asfalttiasemalla lähinnä kovemman sideaineen vaahtotuksen ja erillisen syöttöjärjestelmän osalta. Pehmeä sideaine voidaan puolestaan syöttää normaalia linjaa pitkin suoraan sekoittimeen. Etenkin annosasemilla kovemman sideaineen syöttölinja ja vaahtotusjärjestelmä tulisi puhdistaa paineilmajärjestelmällä käyttökatkojen aikana. (Prowell ym. 2012).

Menetelmää käyttävillä asfalttiasemilla Norjassa kiviaines lämmitetään noin 120 – 130 °C:n lämpötilaan, mutta esimerkiksi käytettäessä asfalttirouhetta lämpötilaa on nostettava hieman kuten myös perinteistä KA-massaa valmistettaessa. Lopullinen valmistuslämpötila vaihtelee noin 100 – 120 °C:n välillä. (Larsen ym. 2004).

Vettä sisältäviin raaka- tai lisäaineisiin perustuvia vaahtotusprosesseja

Advera® WMA & Aspha-Min®

Advera® WMA ja Aspha-Min ovat hyvin hienorakeisia alumiinisilikaateista ja alkalimetal-leista muodostuvia synteettisiä zeoliitteja, jotka sisältävät noin 20 % vettä kiteisessä muodossa. Sitoutunut vesi vapautuu hitaasti yli 100 °C lämpötilassa, mikä aiheuttaa hallitun pitkäaikaisen sideaineen vaahtoutumisen. Sideaineen vaahtoutuminen kasvattaa sen tilavuutta, alentaa viskositeettia ja edistää asfalttimassan työstettävyyttä. (Prowell ym. 2012). Bornaquist (2011) esittää kuitenkin, että zeoliitit vapauttavat niihin sitoutuneen veden jo noin

85 °C lämpötilassa. Zeoliitit eivät muuta asfalttimassan koostumusta valmiissa päällysteessä vaan ne toimivat hienona kiviaineksena veden vapautumisen jälkeen. Veden vapautuminen asfalttimassassa on kuitenkin suhteellisen nopeaa, sillä massan valmistuksen jälkeen päällysteen tulisi olla liikenteelle valmis seuraavan neljän tunnin aikana. (EAPA 2005). Aspha-Min zeoliittien valmistaja kuitenkin ilmoittaa, että veden vapautuminen parantaa asfalttimassan työstettävyyttä jopa 6 – 7 tunnin ajan tai kunnes massan lämpötila laskee alle 100 °C (Prowell ym. 2012).

Advera® WMA:n raekoko on alle 0,075 mm ja Aspha-Min on puolestaan hieman karkeampaa eli raekooltaan noin 0,3 mm. Advera® WMA -zeoliittia lisätään noin 0,2 – 0,25 p-% koko asfalttimassasta ja Aspha-Min-zeoliitille vastaava luku on puolestaan noin 0,3 p-%. (Prowell ym. 2012). Aspha-Min®- ja Advera® WMA -zeoliitit voidaan yleensä lisätä asfalttimassaan samoilla tavoilla (D'Angelo ym. 2008). Zeoliitit voidaan syöttää asfalttimassan sekaan monella eri tavalla esimerkiksi sideaineen lisäyksen yhteydessä tai esisekoittamalla mekaanisesti sideaineeseen hetki ennen sideaineen ja kiviaineksen sekoitusta. Lisäaineita voidaan syöttää myös mekaanisen vaahdotuksen yhteydessä tai esimerkiksi asfalttirouheen sekaan, jossa ne estävät myös materiaalin paakkuuntumista. (Prowell ym. 2012)

PQ Corporation (2012) esittää, että asfalttimassan suunnitteluun ei tarvitse tehdä mitään muutoksia käytettäessä Advera® WMA-lisäainetta, mutta jos velvoittavia ohjeita on olemassa, suunnittelu voidaan toteuttaa niiden avulla. Yrityksen mukaan zeoliitin käytön ei pitäisi estää muiden lisäaineiden käyttöä, mutta silikonilisäaineita on käytetty aiemmin estämään sideaineen vaahdotumista, joten niiden yhteensopivuus tulisi varmistaa. Adveran on kuitenkin havaittu vähentävän hieman sideaineen absorptiota kiviaineksessa.

Advera® WMA:lla valmistuslämpötilaa voidaan alentaa 10 – 39 °C ja Aspha-Min zeoliittilla puolestaan 20 – 30 °C (D'Angelo ym. 2008, Rubio ym. 2011, Perkins 2009). Zeoliittien avulla valmistetulle matalalämpöasfaltille suositellaan Saksassa 130 – 170 °C valmistuslämpötilaa (D'Angelo ym. 2008), mutta myös noin 100 °C minimivalmistuslämpötiloja on ilmoitettu (Perkins 2009). Zeoliitteja käytettäessä valmistuslämpötilan tulisi pysyä alle 190 °C, mikä tarkoittaa, ettei niitä voida käyttää valuasfalttien valmistuksessa (EAPA 2005).

LEA Low Energy Asphalt / Low Emission Asphalt

LEA on MLA:n valmistusprosessi, jossa hyödynnetään sideaineen vaahdotusta. Prosessin alussa kiviaines jaetaan kahteen osaan, joista ensimmäisessä on karkea sekä osa hienosta kiviaineksesta ja toisessa on loput hienosta kiviaineksesta sekä hienoaines. Ensimmäinen osuus kiviaineksesta kuivataan ja lämmitetään noin 150 – 160 °C:n lämpötilaan, minkä jälkeen se peitetään normaaliin lämpötilaan lämmitetyllä sideaineella. Sideaine sisältää noin 0,4 – 0,5 p-% lisäainetta, jonka tarkoituksena on hallita sideaineen vaahdotumista ja parantaa tartuntaa. Kuumalla bitumilla peitetyn karkean kiviaineksen sekaan syötetään tämän jälkeen kylmä ja kostea hieno kiviaines, hienoaines sekä mahdollinen asfalttirouhe, mikä vaahdottaa seoksen sideaineen, jolloin myös loput kiviainesrakeet peittyvät ja lämpenevät. Lisätävän määrän kiviaineksen vesipitoisuus on noin 3 – 4 %. Lopullisen asfalttimassan lämpötila on alle 100 °C ja seokseen jäävä kosteus edistää massan työstettävyyttä. Kyseessä on siis lopullisen valmistuslämpötilan syytä puolimatalalämpöasfaltti. Karkean kiviaineksen lämmityksessä suositellaan käytettäväksi noin 20 °C matalampaa lämpötilaa kuin vastaavan KA:n valmistuksessa. (D'Angelo ym. 2008, Prowell ym. 2012).

Menetelmä vaatii muutamia pieniä muutoksia asfalttiasemaan. Esimerkiksi lisäaineen syöttö sideaineeseen suositellaan tehtäväksi vasta asfalttimassan valmistuksen yhteydessä. Lisäksi asemille tarvitaan erillinen syöttölinja, josta kylmä ja kostea kiviaines syötetään. Asfalttiasemalla tarvitaan myös vesipitoisuusantureita sekä järjestelmä, jolla vesipitoisuutta voidaan muuttaa tarvittaessa. (Prowell ym. 2012).

Prowell ym. (2012) mukaan Low Emission Asphalt tunnetaan Yhdysvaltojen ulkopuolella nimellä Low Energy Asphalt. Kuitenkin esimerkiksi Perkins (2009) ja Zaumanis (2010) esittävät, että Low Emission Asphalt on jatkokehitetty menetelmä, joka perustuu Low Energy Asphalt menetelmään. Eroksi mainitaan, että Low Emission Asphalt menetelmä pohjautuu sideaineen, lisäaineen ja karkean kiviaineksen peräkkäiseen sekoitukseen, mutta esimerkiksi D'Angelo ym. (2008) mukaan Low Energy Asphalt menetelmässä toimitaan samalla tavalla. Puolestaan Rubio ym. (2011) esittävät, että Low Energy Asphalt -menetelmässä ei käytettäisi lisäaineita, mikä on ristiriidassa useiden muiden lähteiden kanssa.

LEAB® Low Energy Asphalt Concrete

Hollantilaisen BAM-yrityksen LEAB®-prosessi perustuu kiviaineksen jaotteluun kuten LEA-prosessissa, mutta kiviaineksen sekaan ei lisätä vettä. Tarvittava vesi lisätään suoraan sideaineeseen kuten vesi-injektiolla toteutetuissa vaahdotusmenetelmissä eli prosessi voidaan lukea kuuluvaksi molempiin vaahdotusryhmiin. LEAB®-prosessissa sideaine vaahdotetaan kuuden suuttimen avulla erillisissä vaahdotuskammioissa, mutta suuttimet voidaan ottaa pois käytöstä perinteistä KA-massaa valmistettaessa. Lisäksi juuri ennen vaahdotusta sideaineen sekaan syötetään 0,1 p-% amiinipohjaista lisäainetta, jonka tarkoituksena on parantaa vaahdon kestävyyttä sekä tartuntaa. Käytettävä lisäaine on samantapaista kuin emulsion valmistuksessa käytettävä lisäaine ja sen uskotaan olevan rasvahappoamiinipohjaista, mikä tarkoittaa, että prosessi on vaahdotuksen ja orgaanisen lisäaineen yhdistelmä. Prosessissa käytetään tyypillisesti 50 % asfalttirouhetta, joka lämmitetään erillisessä rummussa 110 – 115 °C:n lämpötilaan. Prosessissa kiviaines lämmitetään noin 95 °C:n lämpötilaan ja lopulliseksi valmistuslämpötilaksi on ilmoitettu vain 90 °C eli prosessi luetaan kuuluvaksi puolimatalalämpöasfaltteihin. (D'Angelo ym. 2008).

KGO-III-menetelmä

Karl-Gunnar Ohlsonin kehittämässä patentoidussa KGO-III-menetelmässä kiviaineksen karkea jae peitetään bitumilla jonka jälkeen lisätään hienommat jakeet, hiekka ja hienoaines. Kiviainekseen jääneen kosteuden avulla menetelmässä saadaan aikaiseksi saman tyyppinen seos kuin bitumin vaahdotuksessa yleensä. Prosessin tarkoituksena on saada aikaan paremmin tiivistyvä asfalttimassa, joka voidaan valmistaa, levittää ja tiivistää alemmissa lämpötiloissa. (EAPA 2005). Menetelmän etuna on noin 30 °C matalamman valmistuslämpötilan lisäksi mahdollisuus pienentää asfalttimassan bitumipitoisuutta noin 0,5 %. Menetelmää käytetään Ruotsissa hyvin laajasti ja Ruotsin tiehallinto jopa suosittelee sen käyttöä. Vuosien 1998 – 2010 aikana Ruotsin tiehallinnon urakoitsijat levittivät yli 520 000 tonnia KGO-III-menetelmällä valmistettua asfalttimassaa pääosin pintakerroksiin. (Viman 2010).

2-Phase Mixing -menetelmä

Tässä KGO-III-menetelmään perustuvassa menetelmässä käytetään kahta erilaista sideainetta, jotka lisätään eri vaiheissa. Ensimmäinen pehmeä sideaine lisätään kiviaineksen sekaan, minkä jälkeen lisätään kovempi sideaine. Sideaineiden suhde on 1/3 pehmeää ja 2/3

kovempaa sideainetta. Näin valmistetun asfalttimassan valmistus-, levitys- ja tiivistyslämpötila on noin 10 – 30 °C matalampi perinteisiin massoihin verrattuna. WAM® Foam -menetelmä on vaahdotetun bitumin ja 2-Phase Mixing -menetelmän yhdistelmä. (EAPA 2005).

Orgaanisia lisäaineita

Asphaltan® A & Romonta N

Romonta GmbH:n Asphaltan® A ja Romonta N ovat montaanivahoja, joita käytetään pääosin valuasfalttien sideaineen notkeuden ja tartunnan parantamiseen. Asphaltan® A:n hyytymispiste on 78 °C ja Romonta N:n puolestaan 125 °C. Lisäaineilla voidaan alentaa valmistuslämpötilaa noin 20 °C ja tyypillisesti lisättävä määrä on noin 1,5 – 2 p-% bitumin massasta.

Asphaltan® B

Asphaltan® B on jalostetun montaanivahan ja rasvahappoamidien seos (D'Angelo ym. 2008). Lisäaineen vaikutukset ovat samantapaisia kuin FT-vahoilla eli se parantaa sideaineen juoksevuutta ja täten sen avulla voidaan alentaa valmistuslämpötilaa (Chowdhury & Button 2008). Asphaltan® B:n valmistajan ilmoittama hyytymispiste vaihtelee 95 – 105 °C välillä kuten Sasobit® FT-vahalla (Edwards 2006). Sen sulamispiste vaihtelee puolestaan 82 – 95 °C:n välillä, mikä vastaa Sasobit®-vahaa, mutta Sasobit®:n sulamispiste vaihtelee huomattavasti suuremmalla välillä (Van Den Heever 2014). Valmistaja suosittelee, että lisäainetta sekoitetaan sideaineen sekaan 2 – 4 p-% ja se voidaan lisätä sideaineen sekaan asfalttiasemalla tai jo sideaineen valmistuksen yhteydessä. Lisäksi Asphaltan® B:tä voidaan käyttää polymeerimodifioitujen sideaineiden kanssa. Valmistajan mukaan Asphaltan® B parantaa asfalttimassan tiivistymistä sekä vähentää urautumista ja kosteusvaurioita. (Chowdhury & Button 2008). Edwards ym. (2006) tutkimus tukee myös valmistajan ilmoittamia vaikutuksia. Tuotteen valmistaja ei ole ilmoittanut sen vaikutuksista asfalttimassan valmistuslämpötilaan, mutta D'Angelo ym. (2008) mukaan valmistuslämpötilaa voidaan alentaa noin 20 – 30 °C.

Hydrogreen® S (BituTech PER, BituTech RAP®, Astech)

Kasvipohjainen Hydrogreen® S on alun perin kehitetty elvyttimeksi asfalttimassoille, joissa käytetään korkeita asfalttirouhemääriä. Tuotteen tarkoituksena on jäljitellä bitumiryhmää, jonka avulla voidaan alentaa vanhentuneen sideaineen viskositeettia, mikä parantaa sideaineen ominaisuuksia kylmissä lämpötiloissa. Lisäksi sen avulla voidaan parantaa kiviaineksen peittymistä ja asfalttimassan tiivistymistä alemmissa lämpötiloissa. Lisäaineen käyttöä suositellaan vain asfalttimassoille, joilla on korkea asfalttirouhepitoisuus ja myös lisättävä määrä vaihtelee 0,5 – 0,75 p-% välillä asfalttirouheen määrän mukaan. Huoneenlämpötilassa nestemäinen Hydrogreen® S -lisäaine voidaan syöttää sideaineen sekaan sideainesäiliössä tai ennen sideaineen syöttöä asfalttiasemalla. (Prowell ym. 2012). Tuotteen valmistajan mukaan sen avulla voidaan laskea valmistuslämpötilaa noin 28 °C:a (Engineered Additives LLC 2016).

LEADCAP Low Energy and Low Carbon-Dioxide Asphalt Pavement

Vahapohjainen LEADCAP sisältää vahan lisäksi tartuketta sekä lisäainetta, jonka tarkoituksena on hallita vahan kiteytymistä matalissa lämpötiloissa ja vähentää mahdollista halkeilua. Vahakomponentti alentaa sideaineen viskositeettia ja toimii voiteluaineena asfalttimassan valmistuksen ja levityksen yhteydessä kuten vahalisäaineet yleensä. Tuotteen etuna on, että

sen avulla voidaan parantaa sideaineen ominaisuuksia korkeissa käyttölämpötiloissa muuttamatta sen ominaisuuksia matalissa lämpötiloissa. Lisäaine voidaan syöttää suoraan sideainesäiliöön asfalttiasemalla, johon ei täten tarvitse tehdä mitään muutoksia. MLA:n valmistukseen riittää jo 1,5 % lisäys, mutta haluttaessa parantaa päällysteen korkeiden käyttölämpötilojen ominaisuuksia voidaan käyttää 3 – 4 % määrää. Tuotteen avulla asfalttimassan valmistuslämpötilaa voidaan laskea 30 °C. (Prowell ym. 2012).

Licomont® BS 100 & Sübit

Clariant International Ltd:n valmistama Licomont® BS 100 on rasvahappoamidi, joiden sulamispiste vaihtelee tyypillisesti 141 - 146 °C:n välillä (D'Angelo ym. 2008). Lisäaineen jähmettymispiste puolestaan vaihtelee 135 – 145 °C:n välillä ja 3 % lisäys kasvattaa sideaineen pehmenemispistettä 40 – 45 °C (Zaumanis 2010). Kuten orgaaniset lisäaineet yleensä Licomont® BS 100 alentaa sideaineen viskositeettia valmistuslämpötiloissa ja kasvattaa asfalttimassan jäykkyyttä korkeissa käyttölämpötiloissa, mutta haittapuolena se vaikuttaa myös päällysteen ominaisuuksiin kylmissä olosuhteissa. Tuote toimitetaan jauheena tai rakeisessa muodossa ja sideaineeseen lisättävä määrä on noin 3 p-% sideaineen massasta. Sübit on valmis sideaine, johon on sekoitettu valmiiksi Licomont® BS 100 lisäainetta. (D'Angelo ym. 2008).

Sasobit® & Sasoflex®

Ulkomailla MLA:n valmistuksessa hyvin yleisesti käytetty Sasol Wax -yrityksen tuote Sasobit® on Fisher–Tropsch-menetelmällä maakaasusta valmistettu kiteinen pitkäketjuinen hiilivety, jonka pituus vaihtelee yleensä C₄₅ ja C₁₀₀ välillä. Sasobit® vastaa raakaöljystä löydettyjä parafiinivahoja, mutta sen moolimassa on suurempi ja täten se liukenee hyvin bitumiin yli 120 °C:n lämpötilassa eikä erkane varastoinnin yhteydessä. (Sasol Wax 2015). Vahan sulamispiste vaihtelee 70 – 114 °C:n välillä ja sen hyytymispiste puolestaan 98 - 102 °C välillä. Bitumi-vaha-seoksen jäähtyessä vaha jähmettyy tasaisesti jakautuneiksi mikroskooppiseksi tikkumaisiksi partikkeleiksi, joiden uskotaan toimivan runkona seoksen korkeammalle viskositeetille päällysteen käyttölämpötilassa. (D'Angelo ym. 2008, Hurley & Prowell 2005).

Sasobit®-vahaa voidaan sekoittaa kuumaan bitumiin yksinkertaisen sekoittimen avulla, mutta myös muut lisäystavat ovat mahdollisia. Kiinteän Sasobit®-vahan sekoittaminen asfalttimassaan valmistuksen yhteydessä ei ole kuitenkaan suositeltavaa sillä vaha saattaa jakautua massaan epätasaisesti. (Corrigan 2015). Yhdysvalloissa vahaa lisätään tyypillisesti 1 – 1,5 % sideaineen painosta, mutta Saksassa tyypillinen määrä on ollut 2,5 %. Yli 3 % pitoisuutta ei kuitenkaan suositella, sillä Sasobit® jäykistää asfalttimassaa matalissa lämpötiloissa. (D'Angelo ym. 2008). Verrattuna parafiinivahoihin Sasobit®-vahan mahdollisesti aiheuttama haurastuminen kylmissä olosuhteissa on kuitenkin vähäisempää, koska se kiteytyy pienemmiksi partikkeleiksi (Hurley & Prowell 2005).

Sasobit®-vahan lisäksi bitumiin voidaan lisätä polymeerejä kuten styreenibutadieeni-kumia (SBS), mikä on johtanut Sasoflex®-nimisen tuotteen syntyyn. Sasoflex® on siis plastomeerin (Sasobit®) ja elastomeerin (SBS) seos, jonka ainesosat yhdistetään kemiallisen lisäaineen avulla. Sasobit® toimii seoksessa plastomeerina eli se alentaa viskositeettia korkeissa lämpötiloissa ja jäykistää käyttölämpötiloissa. Elastomeerin tarkoitus on puolestaan ylläpitää päällysteen joustavuutta matalissa lämpötiloissa. (Hurley & Prowell 2005).

SonneWarmix™ (AD-RAP, ECOBIT, Sonneborn AR)

SonneWarmix™ on parafiinisten hiilivetyjen seos eli vaha, jolla on melko korkea, noin 79 °C:n sulamispiste. Vaha on huoneenlämpöisenä kiinteää eli se täytyy sulattaa noin 93 – 121 °C lämpötilassa ennen syöttöä sideaineen sekaan. Tuote sekoitetaan sideaineeseen esimerkiksi sideainejalostamolla ennen käyttöä asfalttiasemalla ja sen sideaineeseen lisättävä määrä vaihtelee 0,5 – 1,5 p-% välillä seoksen asfalttirouhemäärän sekä sideaineen modifioinnin mukaan. Käytettäessä vain puhdasta kiviainesta ja modifioimatonta sideainetta suositellaan maksimissaan 0,75 p-% määrää. (Prowell ym. 2012).

Thiopave™ (SEAM Sulfur Extended Asphalt Modifier)

Thiopave™ on patentoitu lisäaine, joka sisältää rikkiä ja orgaanista lisäainetta, jonka tarkoituksena on parantaa tiivistymistä sekä jäykistää asfalttimassaa. Kuvassa 61 esitetyllä kiinteällä lisäaineella korvataan osa asfalttimassan sideaineesta asfalttimassan valmistuksen yhteydessä. Lisäaine syötetään yleensä paineilmatoimisella laitteella tai hihnakuljettimella suoraan sekoittimeen, jossa se sulaa osaksi asfalttimassaa. (Prowell ym. 2012, Van Den Heever 2014). Sekoituksen yhteydessä asfalttimassan lämpötilan tulee olla yli 120 °C, jotta lisäaine sulaa ja jakautuu massan sekaan tasaisesti. Thiopave™-lisäaineella korvataan tyypillisesti noin 20 – 25 % sideaineen tilavuudesta, mutta asfalttimassan suunnittelua varten tarkka määrä voidaan lasketa erillisellä kaavalla. (Prowell ym. 2012). Thiopave™-lisäainetta käytettäessä asfalttimassan valmistuslämpötila vaihtelee noin 125 – 145 °C:n välillä (Prowell ym. 2012, Van Den Heever 2014). Lehtipuun (1983) mukaan rikin avulla voidaan alentaa sideaineen viskositeettia, mutta 1 – 6 kuukauden jälkeen päällysteen loppukovuus on tavanomaista päällystettä suurempi. Rikki parantaa myös sideaineen tartuntaa epäsuotuisaan kiviainekseen, mutta sen vaikutus päällysteen kulutus- ja säänkestävyyteen on kuitenkin epäselvä ja niin kutsuttu rikkiasfaltti mielletäänkin kylmähauraaksi.



Kuva 61. Thiopave™ pellettejä (Prowell ym. 2012).

3E LT (Ecoflex)

Aiemmin nimellä Ecoflex tunnettu 3E LT on ranskalaisen Colas-yrityksen patentoima prosessi, josta ei juurikaan ole tietoa saatavilla. D'Angelo ym. (2008) mukaan kyseessä on prosessi, jossa käytetään orgaanista lisäainetta ja sen avulla voidaan alentaa valmistuslämpötilaa jopa 30 – 40 °C. Yrityksen verkkosivuilla on esitetty tuote nimeltä ”3E Asphalt concrete”, jonka on sanottu alentavan valmistus- ja levityslämpötilaa jopa 40 – 45 °C (Colas 2016).

Kemiallisia lisäaineita

Cecabase RT®

Ranskassa 2000-luvun alussa kehitetty nestemäinen Cecabase RT® on vesivapaa tensidi-seos, joka toimii kahdella tavalla. Sen tarkoituksena on alentaa pintajännitystä kiviaineksen pinnalla, mikä edistää kiviaineksen peittymistä ja tartuntaa. Lisäaineen toinen tarkoitus on toimia voiteluaineena kiviaineksen ja sideaineen välillä yli 90 °C lämpötiloissa, mikä parantaa työstettävyyttä ja tiivistettävyyttä. (Prowell ym. 2012).

Lisäaine sekoitetaan sideaineen kanssa sideainesäiliössä tai vasta asfaltin valmistuksen yhteydessä ennen sideaineen syöttämistä kiviaineksen sekaan kuten tavalliset nestemäiset tartutukset (Prowell ym. 2012). Asfalttiasemaan ei siis todennäköisesti tarvitse tehdä muutoksia. Lisäaineen tyypillinen määrä sideaineessa on 0,2 – 0,5 p-% välillä ja sen avulla valmistuslämpötilaa voidaan laskea 30 – 40 °C (Prowell ym. 2012, Rubio ym. 2011). Asfalttiasan valmistuslämpötilaksi on ilmoitettu jopa vain 102 °C (Perkins 2009).

Evotherm®

Evotherm® tuotteita valmistaa WestRock-niminen (MeadWestvaco & RockTenn) yritys, jonka valikoimissa on kolme erilaista prosessia, joiden tarkat sisällöt ovat yrityssalaisuuksia. Vuonna 2005 markkinoille tullut Evotherm® oli ensimmäinen kemiallinen lisäaine, jota käytettiin MLA:n valmistuksessa Yhdysvalloissa. Sen tarkoituksena on parantaa kiviaineksen peittymistä, työstettävyyttä ja tartuntaa tavanomaista matalammissa lämpötiloissa. Nykyään nimellä Evotherm ET (Emulsion Technology) tunnettu tuote toimitetaan valmiina emulsiona, joka sisältää noin 70 p-% sideainetta. Sekoittaessa kuuman kiviaineksen kanssa emulsiossa oleva vesi höyrystyy ja jättää jälkeen vain sideaineen ja kemialliset lisäaineet. Evotherm ET:n seuraajat Evotherm DAT ja Evotherm 3G ovat kuitenkin pääosin syrjäyttäneet sen. (Bonaquist 2011).

Evotherm DAT (Dispersed Additive Technology) -prosessissa käytetään samoja kemikaaleja kuin Evotherm ET -prosessissa, mutta kemikaalit laimennetaan vedellä, jonka määrä vaikuttaa myös valmistuslämpötilan muutoksen suuruuteen. Annospriaatteella toimivilla asfalttiasemilla Evotherm DAT -prosessissa liuos ruiskutetaan suoraan sekoittimeen. Lisäainetta on myös käytetty vesi-injektiolla toteutetuissa vaahdotusmenetelmissä. (Prowell ym. 2012).

Kolmannen sukupolven Evotherm 3G on puolestaan täysin vedetön prosessi, joka mahdollistaa lisäaineen sekoittamisen sideaineeseen jo sideainesäiliössä, josta se voidaan toimittaa asfalttiasemille tavanomaisesti tai käyttää asfalttiasemalla suoraan. Täten se ei myöskään vaadi muutoksia asfalttiasemaan, mutta esimerkiksi asfalttiaseman sideainesäiliö kannattaa tyhjentää huolellisesti ennen kuin se täytetään sideaineella, johon tuotetta on jo lisätty. Tuotetta markkinoitiin aluksi nimellä REVIX. (Prowell ym. 2012). Tuote koostuu hyvin monesta erilaisesta lisäaineesta, jotka ovat muun muassa tensidejä, vahoja ja polymeerejä (Chowdhury & Button 2008).

HyperTherm / QualiTherm (Iterlow-T)

HyperTherm on Kanadassa kehitetty vedetön rasvahappoon perustuva kemiallinen lisäaine, jota markkinoidaan Yhdysvalloissa nimellä QualiTherm. Sen tarkoituksena on mahdollistaa tavanomaista alemmat valmistus- ja tiivistyslämpötilat tai kuuma-asfalttien kanssa käytettynä parantaa massan työstettävyyttä. Lisäainetta voidaan lisätä sideainesäiliöön tai suoraan

asfalttiasemalla valmistuksen yhteydessä. Sideaineeseen lisättävä määrä on tyypillisesti 0,2 – 0,3 p-%, jolloin lisäaineella pitäisi olla vain pieniä vaikutuksia bitumin reologisiin ominaisuuksiin. Tuotetta käytettäessä valmistuslämpötilaksi on raportoitu jopa vain 120 °C ja tiivistyslämpötilaksi puolestaan 90 °C. Lisäaineen avulla on tehty useita koekohteita Pohjois-Amerikassa. (Prowell ym. 2012).

Rediset WMX / Rediset LQ

AkzoNobel:n valmistama kemiallinen tuote Rediset WMX esiteltiin Yhdysvalloissa vuonna 2007 ja sitä markkinoidaan MLA:n lisäaineena, jolla on tartuntaa parantavia ominaisuuksia (Bonaquist 2011). Rediset LQ esiteltiin vuonna 2011 ja se on Rediset WMX:n nestemäinen versio (Prowell ym. 2012). Rediset WMX toimitetaan pelletteinä, joita voidaan lisätä suoraan jalostamon sideainesäiliöön, josta se voidaan jaella asfalttiasemille. Vaihtoehtoisesti pelletit voidaan syöttää asfalttiaseman sideainesäiliöön tai puhalttaa rumpuun kuten SMA:ssa käytetyt kuidut. (Bonaquist 2011). Useimmissa tapauksissa lisäaine kuitenkin sekoitetaan sideaineen kanssa etukäteen, mutta Rediset LQ -nestettä voidaan myös syöttää asfalttiasemalla esimerkiksi saman tyyppisellä kalustolla kuin nestemäisiä tartukkeita. Rediset-lisäaineita käytettäessä asfalttimassan suunnitteluun tai asfalttiasemaan ei tarvitse tehdä mitään muita muutoksia kuin laskea massan valmistuslämpötilaa. Tuotteen ominaisuuksien ansiosta sen lisäksi ei tarvita yleensä muita tartukkeita. (Prowell ym. 2012)

Rediset ei sisällä vettä, vaan se on kationisten tensidien eli pinta-aktiivisten aineiden sekä reologisia ominaisuuksia muokkaavan lisäaineen yhdistelmä. Sen tarkoituksena on alentaa sideaineen pintajännitystä, mikä edistää kiviaineksen peittymistä ja parantaa työstettävyyttä. Tuotteen avulla valmistus- ja tiivistyslämpötilaa voidaan laskea jopa noin 33 °C ja sen on sanottu parantavan kiviaineksen ja sideaineen välistä tartuntaa vaikka kiviaineksen pinnalle olisi jäänyt kosteutta. (Prowell ym. 2012)

Rediset WMX:n suositeltava käyttömäärä vaihtelee 0,5 – 2,5 p-% välillä. Pienet määrät toimivat hyvin pelkkänä tiivistysapuna ja puolestaan suuret määrät on tarkoitettu modifioituihin bitumeihin perustuviin matalalämpöasfaltteihin. (Bonaquist 2011, Prowell ym. 2012). Modifioimattomaan bitumiin perustuvalle MLA:lle sopiva määrä on 1 – 1,5 p-%. Nestemäiselle Rediset LQ -tuotteelle suositeltu määrä on vain 0,4 – 0,75 p-% sideaineen massasta. (Prowell ym. 2012)

ZycoTherm

ZycoTherm on nanoteknologiaan perustuva kemiallinen yhdiste, joka koostuu orgaanisista ryhmistä sekä piistä eli se on organosilaani. Sen toiminta perustuu sen kykyyn muodostaa kemiallisia sidoksia piin yhdisteiden kanssa kiviaineksen pinnalla. Tuotteen valmistajan mukaan sideaineeseen lisättävä määrä on vain 0,05 – 0,15 p-% ja sen avulla voidaan parantaa asfalttimassan tartuntaa ja tiivistymistä. (Rafiee & Javid 2015). Raja ym. (2015) mukaan lisäaineen avulla voidaan valmistaa MLA-massaa vain noin 95 – 120 °C lämpötilassa, mutta Rafiee & Javid (2015) toteavat tutkimuksessaan, että 3,7 % piitä sisältävää kalkkikiveä käytettäessä valmistuslämpötilaa on mahdollista laskea vain noin 5 °C:a. He kuitenkin havaitsivat, että lisäaine tekee kiviaineksesta vettähylykivää ja parantaa sideaineen ja kiviaineksen välistä tartuntaa.

Liite 2. Kosteusvaurioherkkyystutkimuksen kohteiden yhteenveto sekä tuloksia (Epps Martin ym. 2014)

Table 2-1. Summary of field projects.

Location and Environment Condition	Location	Construction Completion Date	Mixtures	Aggregates	Asphalt Binder	Additives			Field Compaction Temperature (°F)	Coring Dates
						RAP	RAS	Anti-Strip Agent		
Iowa (Wet, Freeze)	US 34, near Corning	Sep. 2011	HMA+RAP	Quartzite, Limestone, Field Sand	PG 58-28	17%	None	None	295-300	Sep. 2011 Mar. 2012 Sep. 2012
			Evotherm 3G+RAP						240-248	
			Sasobit+RAP						235-240	
Montana (Dry, Freeze)	IH 15, near Dillon	Oct. 2011	HMA	Siliceous	Modified PG 70-28	None	None	1.4% Lime	310-315	Oct. 2011 Apr. 2012
			Evotherm 3G						270-280	
			Sasobit						275-280	
			Foaming						270-275	
Texas (Wet, No-Freeze)	FM 973, near Austin	Jan. 2012	HMA	Limestone, Field Sand	Modified PG 70-22	None	None	None	275-285	Jan. 2012 Sep. 2012
			Evotherm DAT						230-235	
			Foaming						240-250	
New Mexico (Dry, No-Freeze)	IH 25, near Truth or Consequences	Oct. 2012	HMA+RAP	Siliceous Gravel	Modified PG 64-28	35%	None	1% Versabind	285-290	Oct. 2012
			Evotherm 3G+RAP						255-260	
			Foaming+RAP						265-270	

Table 3-3. Summary trends for IDT strength results.

Location	Specimen Type	Wet IDT			TSR		
		Evotharm	Sasobit	Foaming	Evotharm	Sasobit	Foaming
Iowa	Cores at construction	Fail		N/A			N/A
	Cores after winter				Fail		
	Cores after summer						
	Onsite PMLC				Pass	Pass	
	Offsite PMLC				Fail		
	LMLC					Fail	
Montana	Cores at construction						
	Cores after winter						
	Onsite PMLC	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail
	Offsite PMLC	Pass	Pass			Pass	
Texas	Cores at construction	Fail		Fail	Fail		
	Cores after summer						
	Onsite PMLC		N/A		Fail	N/A	Fail
	Offsite PMLC			Pass	Fail		Fail
	LMLC						
New Mexico	Cores at construction	Pass					
	Onsite PMLC		N/A			N/A	
	Offsite PMLC						
	LMLC			Fail	Fail		Fail
Key		WMA ≥ HMA			WMA < HMA		

PMLC = Asfalttimassa valmistettu asfalttiaseamalla ja tiivistetty laboratoriossa

LMLC = Asfalttimassa valmistettu ja tiivistetty laboratoriossa

Vihreä = MLA:n tulos on yhtä hyvä tai parempi kuin vertailtavan KA:n

Punainen = MLA:n tulos on huonompi kuin vertailtavan KA:n

Fail = Tulos ei täytä sille asetettuja vaatimuksia, vaikka se on yhtä hyvä tai parempi kuin vertailtavan KA:n tulos.

Pass = Tulos täyttää sille asetetut vaatimukset, vaikka se on huonompi kuin vertailtavan KA:n

N/A = Tulosta ei saatavilla

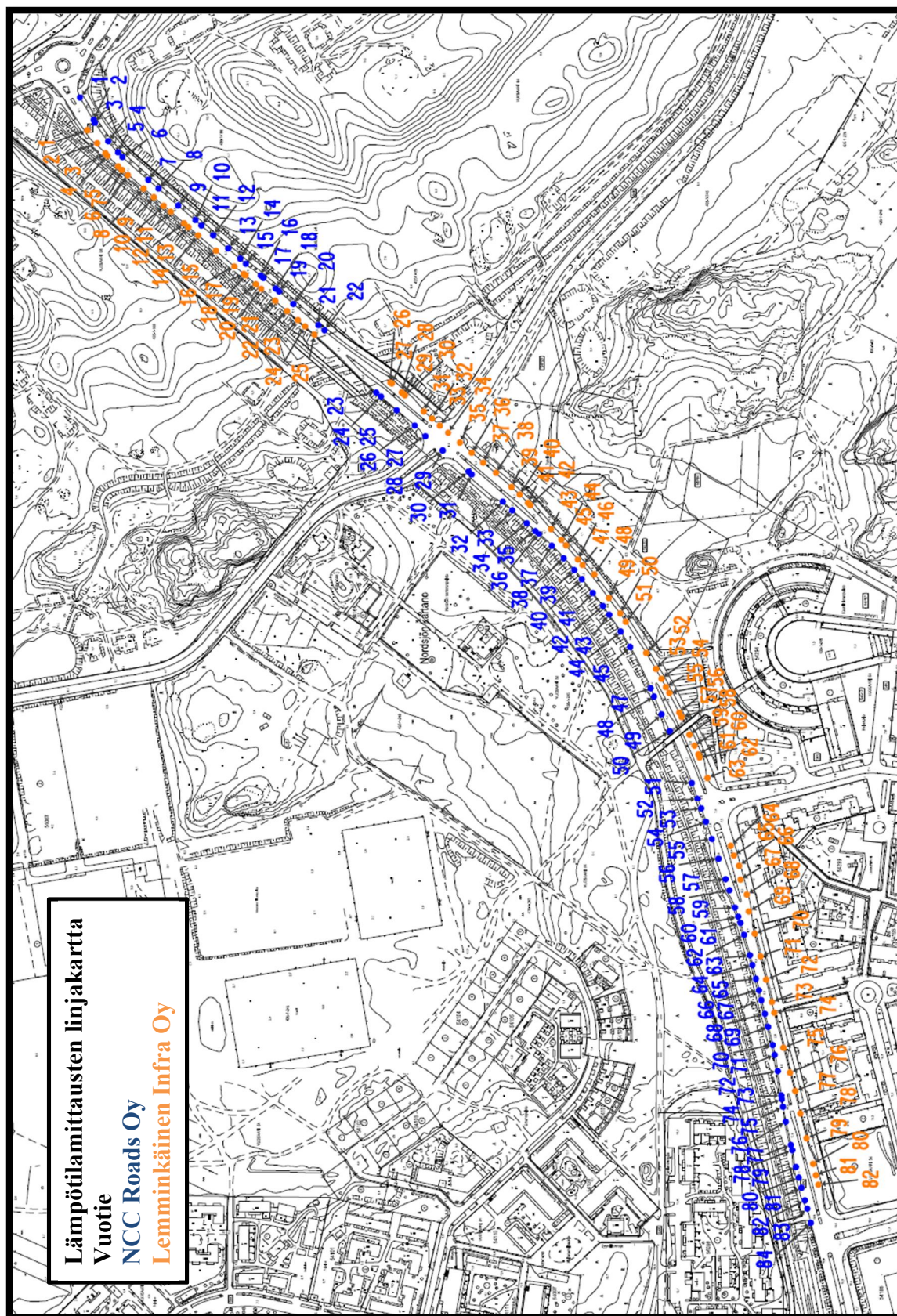
Table 3-4. Summary trends for HWTT results.

Location	Specimen Type	HWTT SIP			HWTT Stripping Slope				
		Evotherm	Sasobit	Foaming	Evotherm	Sasobit	Foaming		
Iowa	Cores at construction	Fail	Fail	N/A			N/A		
	Cores after winter	Fail	Fail						
	Cores after summer	Fail	Fail						
	Onsite PMLC	Fail	Fail						
	Offsite PMLC	N/A			N/A				
	LMLC	Fail	Fail						
Montana	Cores at construction								
	Cores after winter			Fail					
	Onsite PMLC								
	Offsite PMLC			Pass					
Texas	Cores at construction		N/A			N/A			
	Cores after summer								
	Onsite PMLC			Fail					
	Offsite PMLC	Pass							
	LMLC								
New Mexico	Cores at construction		N/A		N/A				
	Onsite PMLC								
	Offsite PMLC								
	LMLC								
Key		WMA ≥ HMA		WMA < HMA					

Table 3-5. Summary trends for M_R results.

Location	Specimen Type	Wet M_R			M_R -ratio		
		Evotherm	Sasobit	Foaming	Evotherm	Sasobit	Foaming
Iowa	Onsite PMLC		N/A		Fail	Fail	N/A
	Offsite PMLC				Fail	Fail	
	LMLC				Fail	Fail	
Montana	Onsite PMLC						Pass
	Offsite PMLC						
Texas	Onsite PMLC		N/A		Fail	N/A	Fail
	Offsite PMLC				Fail		
	LMLC						
New Mexico	Onsite PMLC		N/A			N/A	
	Offsite PMLC						
	LMLC				Fail		Fail
Key		WMA \geq HMA			WMA < HMA		

Liite 3. Vuotien levityslämpötilamittausten linjakartta sekä mittaustulokset



Vuotien levityslämpötilat, Lemminkäinen Infra OyLevityslämpötilojen väriasteikot T_{levitys} (°C)

<i>Yläraja</i>	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80
<i>Alaraja</i>	161	151	141	131	121	111	101	91	81	71

Linja #	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)
1	135	145	145
2	119	115	130
3	125	130	140
4	129	126	133
5	127	131	132
6	117	122	132
7	113	120	120
8	128	134	137
9	125	133	137
10	120	130	130
11	106	105	118
12	120	129	134
13	121	132	134
14	120	120	130
15	116	118	131
16	125	128	141
17	120	128	140
18	110	119	132
19	115	138	130
20	125	133	133
21	126	140	145
22	124	130	136
23	117	123	135
24	130	134	138
25	123	112	138
26	130	113	120
27	132	113	118
28	128	115	113
29	130	100	138
30	120	123	118
31	135	140	128
32	127	131	120
33	128	126	95
34	120	135	115
35	134	132	125
36	135	138	124
37	130	130	118
38	122	138	123
39	137	137	125
40	125	128	120
41	130	119	113
42	130	105	114

Linja #	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)
43	140	141	124
44	135	116	117
45	120	110	125
46	137	138	125
47	130	135	120
48	140	134	105
49	136	120	116
50	132	133	119
51	130	123	105
52	142	136	131
53	139	139	120
54	118	116	110
55	115	133	128
56	120	136	120
57	143	140	125
58	135	137	120
59	134	136	110
60	136	133	120
61	130	120	120
62	136	130	127
63	130	124	120
64	120	125	115
65	122	117	113
66	120	136	112
67	130	134	120
68	130	130	110
69	126	131	125
70	134	140	125
71	137	112	110
72	138	136	124
73	135	138	120
74	127	110	105
75	134	133	130
76	126	131	131
77	140	136	135
78	140	130	132
79	145	140	135
80	130	125	125
81	144	135	140
82	153	142	138

Vuotien levityslämpötilat, NCC Roads Oy
 Levityslämpötilojen väriasteikot T_{levitys} (°C)

<i>Yläraja</i>	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80
<i>Alaraja</i>	161	151	141	131	121	111	101	91	81	71

Linja #	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)
1	126	130	119
2	140	123	123
3	149	142	142
4	137	125	128
5	128	118	110
6	120	120	114
7	130	115	130
8	130	110	118
9	132	126	122
10	133	120	120
11	120	121	117
12	131	128	120
13	138	134	130
14	125	115	112
15	125	110	119
16	131	133	121
17	132	114	117
18	127	125	105
19	114	100	102
20	133	130	113
21	128	110	113
22	130	125	124
23	115	115	100
24	105	100	103
25	130	113	122
26	128	120	122
27	123	124	110
28	114	105	130
29	120	126	126
30	108	121	124
31	95	111	132
32	115	105	133
33	143	140	125
34	105	104	140
35	114	99	135
36	120	110	135
37	115	130	125
38	108	111	126
39	130	139	142
40	121	134	137
41	121	134	137
42	118	135	140

Linja #	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)
43	116	123	130
44	105	97	129
45	105	104	120
46	ei saatavilla		
47	112	117	120
48	109	113	118
49	120	122	136
50	114	133	136
51	107	110	122
52	130	117	130
53	131	137	133
54	130	130	142
55	121	131	132
56	113	120	132
57	115	115	142
58	107	104	135
59	103	114	125
60	117	123	123
61	134	150	150
62	130	147	145
63	126	148	139
64	125	145	141
65	146	150	149
66	128	139	144
67	134	144	145
68	124	131	127
69	145	150	165
70	130	149	155
71	125	135	145
72	118	132	127
73	130	135	135
74	130	125	131
75	125	126	125
76	122	126	130
77	116	123	125
78	116	121	125
79	123	124	130
80	121	130	120
81	123	113	124
82	118	118	123
83	114	120	127
84	117	116	125

Liite 4. Vuotien tyhjätilatutkimusten tulokset

Urakoitsija	Linja-Piste	T _{levitys} (°C)	Kappaletiheys (Mg/m ³)	Maksimitiheys (Mg/m ³)	Tyhjätila (%)	Työ- Näyte
NCC Roads Oy	5-1	128	2,541	2,639	3,7 %	247-11
NCC Roads Oy	5-3	110	2,549	2,615	2,6 %	246-11
NCC Roads Oy	7-1	130	2,548	2,614	2,5 %	247-21
NCC Roads Oy	7-3	130	2,467	2,602	5,2 %	247-31
NCC Roads Oy	18-3	105	2,527	2,632	4,0 %	246-21
NCC Roads Oy	22-1	130	2,489	2,618	4,9 %	247-41
NCC Roads Oy	24-2	100	2,439	2,625	7,1 %	248-11
NCC Roads Oy	24-3	103	2,499	2,634	5,1 %	246-31
NCC Roads Oy	24-3	103	2,441	2,633	7,3 %	248-21
NCC Roads Oy	31-1	95	2,481	2,616	5,2 %	248-31
NCC Roads Oy	35-2	99	2,472	2,643	6,5 %	248-41
NCC Roads Oy	38-1	108	2,499	2,631	5,0 %	246-41
NCC Roads Oy	39-1	130	2,531	2,642	4,2 %	247-51
NCC Roads Oy	44-1	105	2,564	2,629	2,5 %	246-51
NCC Roads Oy	44-2	97	2,509	2,615	4,0 %	248-51
NCC Roads Oy	52-1	130	2,529	2,596	2,6 %	247-61
NCC Roads Oy	52-3	130	2,512	2,645	5,0 %	247-71
NCC Roads Oy	58-1	107	2,487	2,627	5,3 %	246-61
NCC Roads Oy	62-1	134	2,471	2,558	3,4 %	247-81
NCC Roads Oy	79-3	130	2,521	2,619	3,7 %	247-91
Lemminkäinen Infra Oy	2-3	130	2,307	2,449	5,8 %	251-11
Lemminkäinen Infra Oy	11-1	106	2,338	2,446	4,4 %	250-11
Lemminkäinen Infra Oy	14-3	130	2,366	2,443	3,2 %	251-21
Lemminkäinen Infra Oy	18-1	110	2,371	2,494	4,9 %	250-21
Lemminkäinen Infra Oy	18-3	132	2,362	2,446	3,4 %	251-31
Lemminkäinen Infra Oy	29-1	130	2,363	2,426	2,6 %	251-41
Lemminkäinen Infra Oy	29-2	100	2,352	2,429	3,2 %	252-11
Lemminkäinen Infra Oy	33-3	95	2,290	2,438	6,1 %	252-21
Lemminkäinen Infra Oy	37-1	130	2,383	2,452	2,8 %	251-51
Lemminkäinen Infra Oy	42-1	130	2,322	2,439	4,8 %	251-61
Lemminkäinen Infra Oy	48-3	105	2,338	2,444	4,3 %	250-31
Lemminkäinen Infra Oy	51-1	130	2,323	2,473	6,1 %	251-71
Lemminkäinen Infra Oy	51-3	105	2,347	2,463	4,7 %	250-41
Lemminkäinen Infra Oy	59-3	110	2,371	2,442	2,9 %	250-51
Lemminkäinen Infra Oy	68-1	130	2,356	2,464	4,4 %	251-81
Lemminkäinen Infra Oy	68-3	110	2,332	2,461	5,2 %	250-61
Lemminkäinen Infra Oy	74-3	105	2,368	2,447	3,2 %	250-71
Lemminkäinen Infra Oy	V4		2,435	2,515	3,2 %	253-11
Lemminkäinen Infra Oy	V4		2,472	2,515	1,7 %	253-12
Lemminkäinen Infra Oy	V5		2,407	2,442	1,4 %	253-21
Lemminkäinen Infra Oy	V5		2,401	2,442	1,7 %	253-22
Lemminkäinen Infra Oy	V6		2,439	2,484	1,8 %	253-31
Lemminkäinen Infra Oy	V6		2,444	2,484	1,6 %	253-32
Lemminkäinen Infra Oy	V1		2,419	2,476	2,3 %	253-41
Lemminkäinen Infra Oy	V1		2,410	2,476	2,7 %	253-42
Lemminkäinen Infra Oy	V2		2,450	2,484	1,4 %	253-51
Lemminkäinen Infra Oy	V2		2,426	2,484	2,3 %	253-52
Lemminkäinen Infra Oy	V3		2,450	2,477	1,1 %	253-61
Lemminkäinen Infra Oy	V3		2,402	2,477	3,0 %	253-62

Liite 5. Vuotien uraprofiilimittausten tulokset ja urasyvyystulkinta

Vuotien uraprofiilimittausten tulkinta tehtiin tietokoneella laskettujen keskiarvokäyrien perusteella. Keskiarvokäyrän arvot laskettiin viiden mittauspisteen perusteella eli viiden senttimetrin välein, minkä tarkoituksena oli vähentää yksittäisten poikkeamien vaikutusta urasyvyyksiin.

Uraprofiilien tulkinnassa havaittiin, että kaistojen poikkiprofiilit olivat lähes poikkeuksetta keskeltä alempana kuin reunoilta. Tämä ei ollut kuitenkaan havaittavissa silmämääräisesti kohteella, minkä vuoksi havaintoa selvitettiin oikolaudan ja uratulkinn avulla keväällä 2016. Myös oikolautamittauksissa todettiin, että kaistan keskikohta oli reunoja alempana, mutta ajourat olivat jo selvästi keskikohtaa syvempiä. Tästä syystä profiilien tulkinnassa käytettiin ensimmäisiä mittauksia lähtöreferenssinä, mikä tarkoitti, että profiilit täytyi kohdistaa toisiinsa nähden.

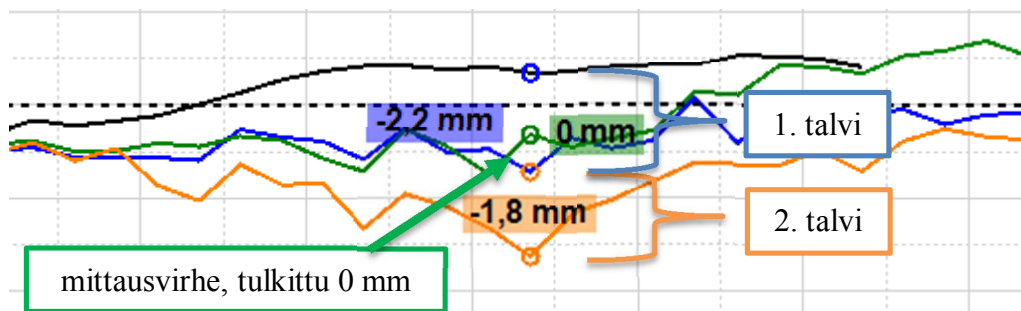
Kohdistus päätettiin toteuttaa profiilien ajourien välisellä alueella, jonka korkotason oletettiin pysyneen ennallaan mittausten välillä. Profiilit ovat kohdistettu toisiinsa ensin mahdollisimman hyvin selvien muotojen ja urien perusteella, minkä jälkeen profiilit nostettiin vuoden 2016 kevään profiilin tasolle ajourien välisellä alueella. Uraprofiilikuvissa nollatasona on käytetty kevään 2016 profiilimittausten alku- ja loppupisteen väliä, koska profiilimittauksissa profilometrin kulma kaistan yläpuolella on vaihdellut. Toisin sanoen kaikkia profileja on käännetty lähtökohtaisesti siten, että niiden alku- ja loppupiste ovat samalla tasolla. Tästä syystä profiilikuvia ei voida käyttää esimerkiksi vesiuramallin mukaisessa tulkinnassa.

Syksyn 2014 mittausten perusteella ei voitu määrittää alku-uria, koska kyseessä oli ensimmäinen mittauskerta, eikä profileissa ollut selviä alku-uria havaittavissa. Profiilien erikoinen muoto saattaa olla myös osasyynä alku-urien puuttumiselle.

Urasyvyydet laskettiin verrattuina edellisiin mittauksiin seuraavasti:

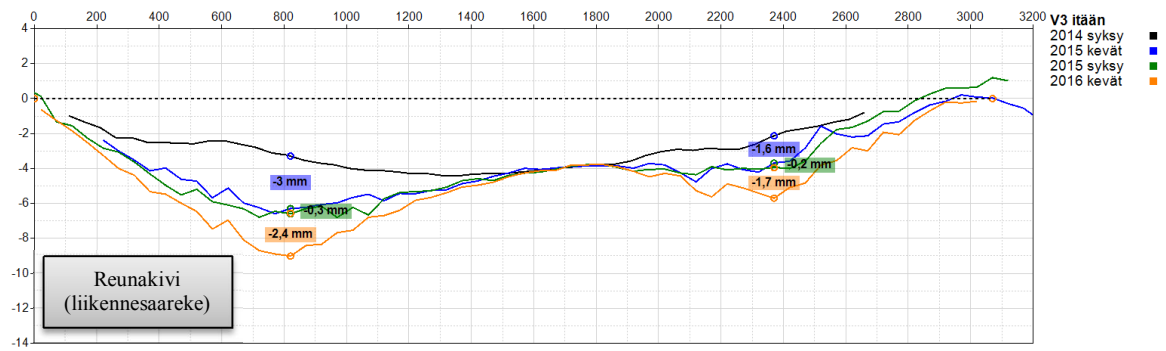
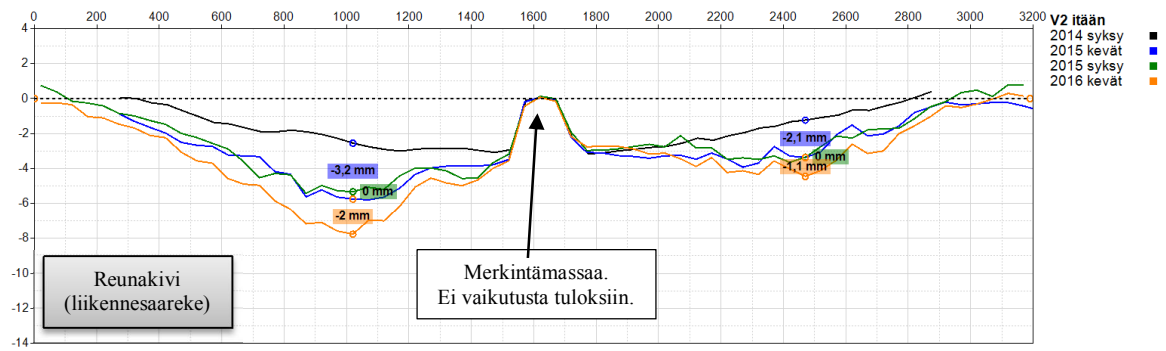
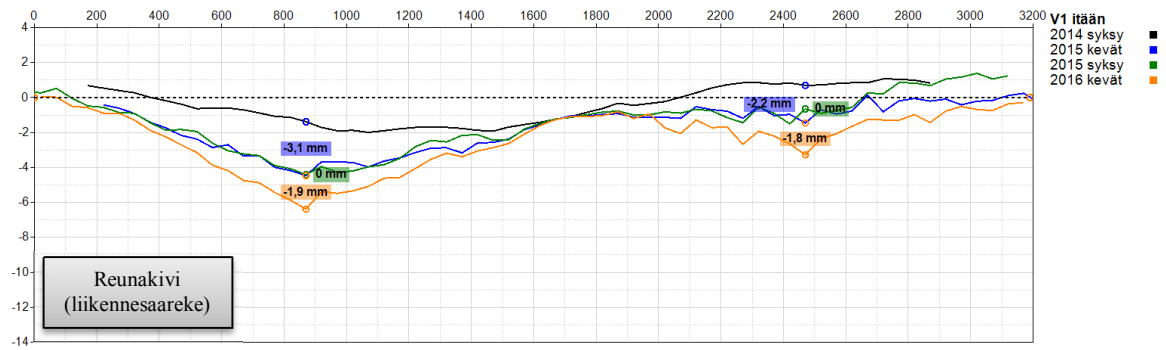
- 2014 syksy → 2015 kevät (1. talvi), **sininen**
- 2015 kevät → 2015 syksy (1. kesä), **vihreä**
- 2015 syksy → 2016 kevät (2. talvi), **oranssi**

Joissakin tapauksissa kesän 2015 urasyvyydet olivat positiivisia, mikä voidaan olettaa mittaustavirheeksi. Näissä tapauksissa urasyvyydeksi merkittiin 0 mm ja toisen talven urasyvyys laskettiin edellisen talven mittaustulosten perusteella, kuten kuvassa 62 on esitetty.

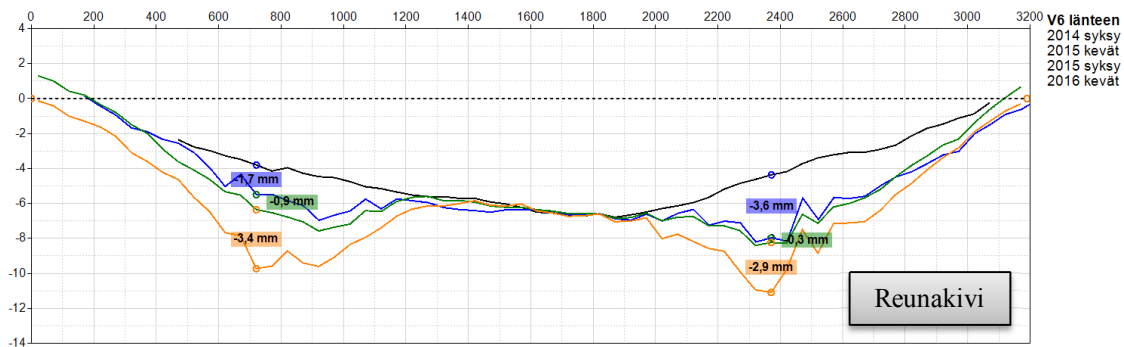
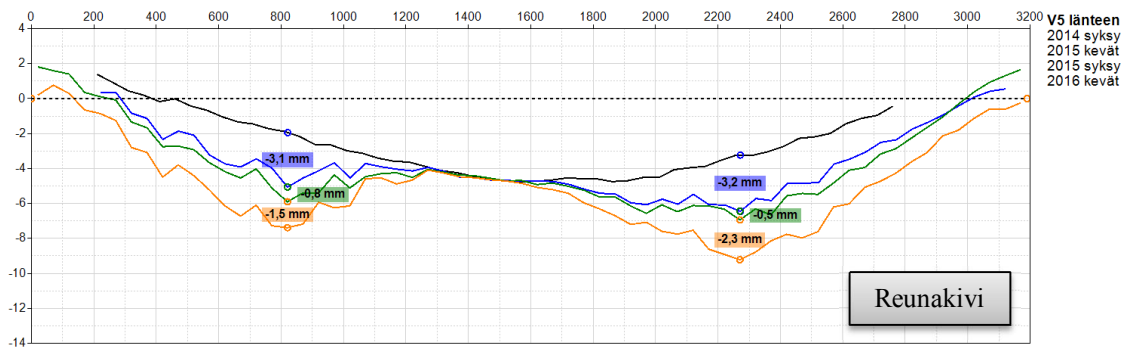
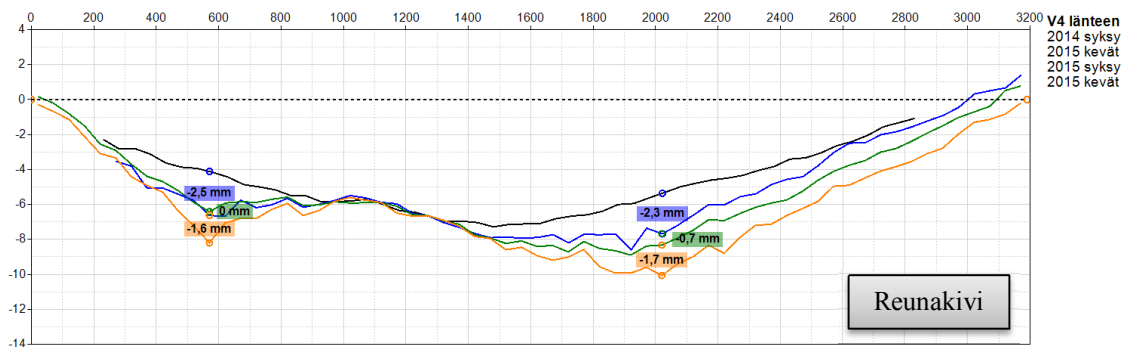


Kuva 62. Urasyvyyksien tulkinta mittaustavirhetapauksissa (profiili V1 itään).

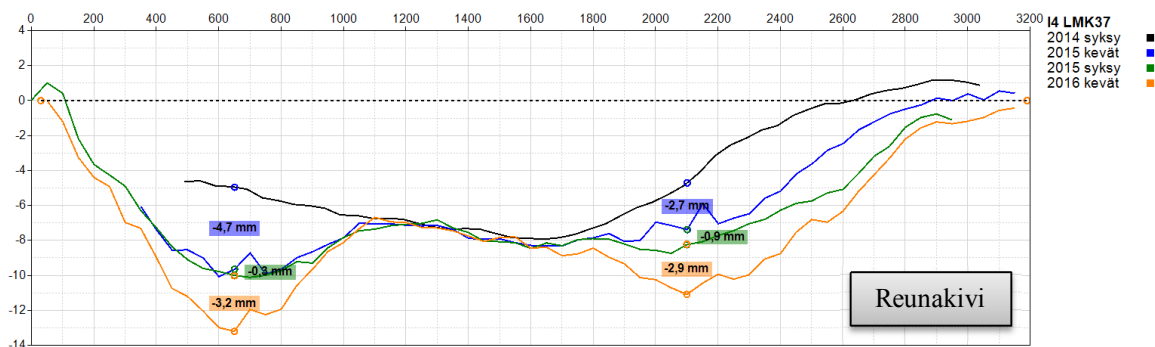
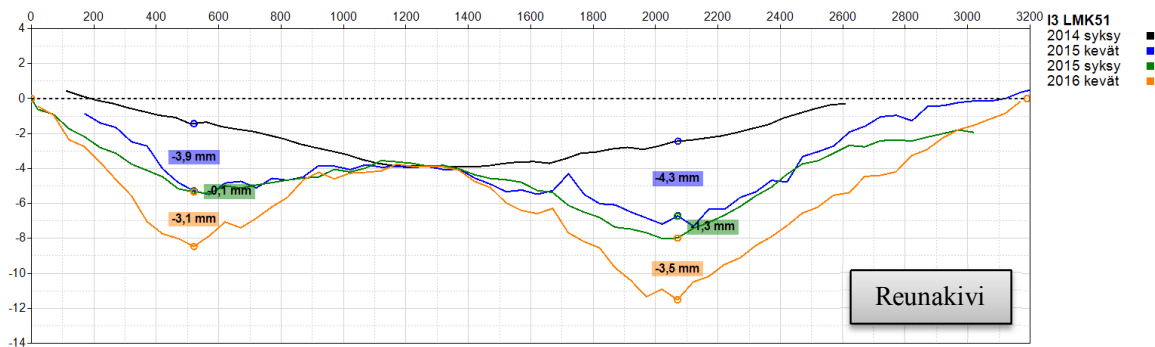
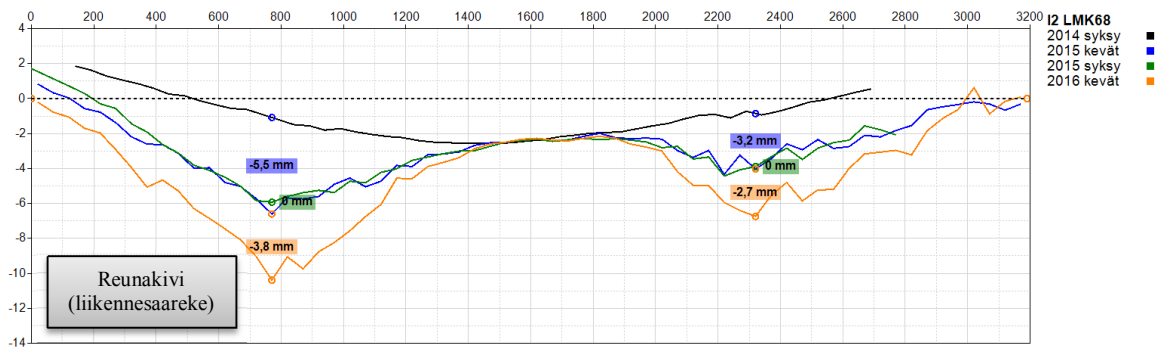
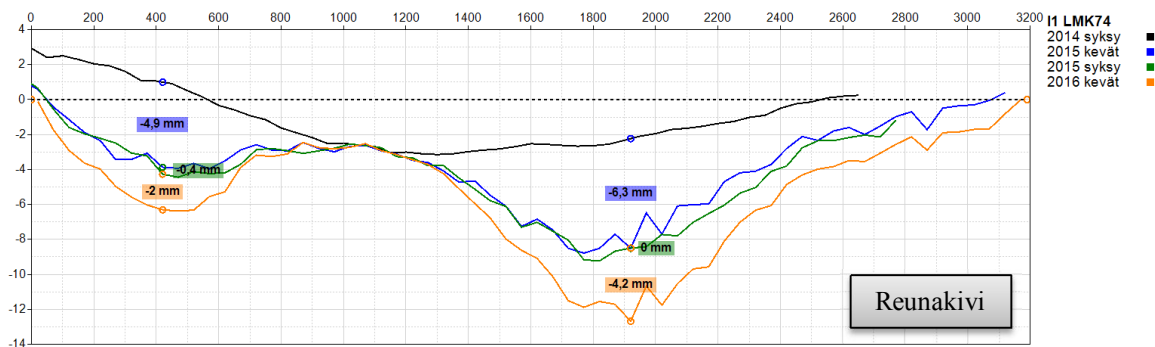
Vertailuprofiilit V1 – V3 itään



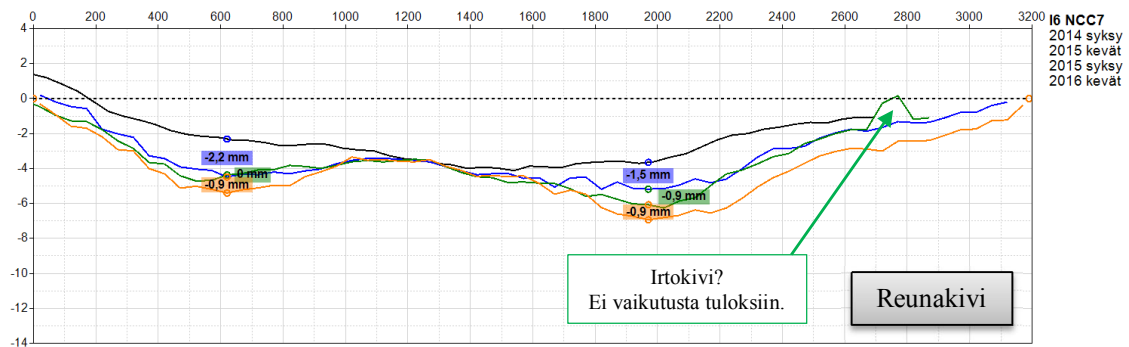
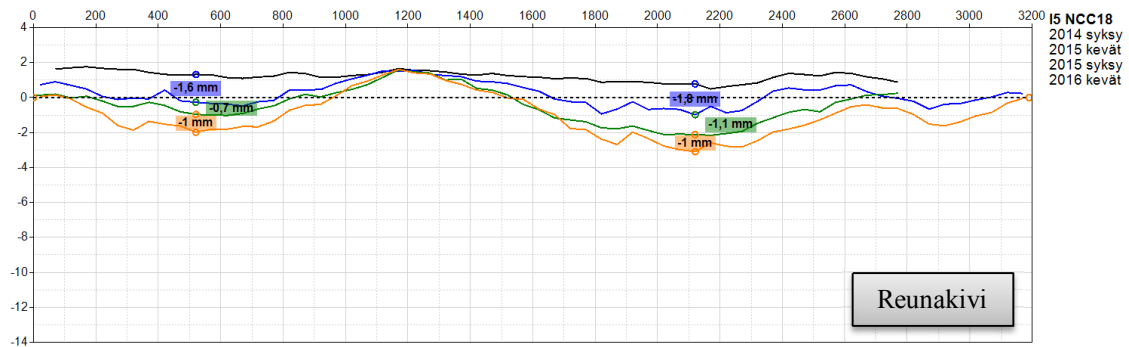
Vertailuprofiilit V4 – V6 länteen



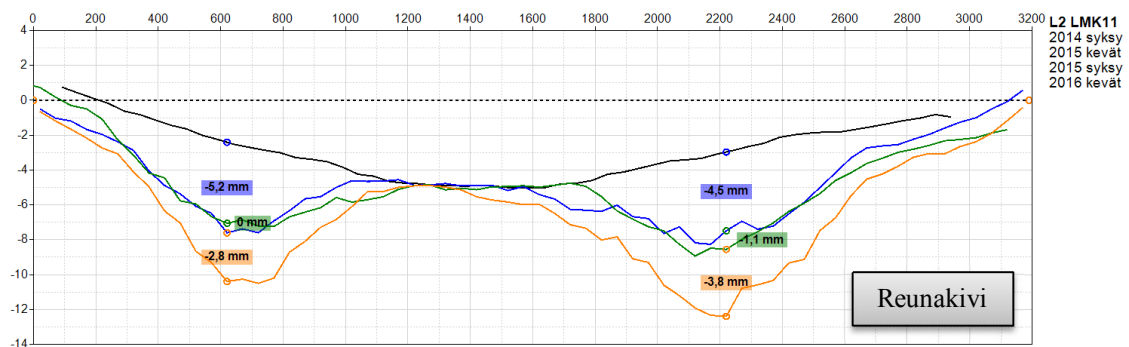
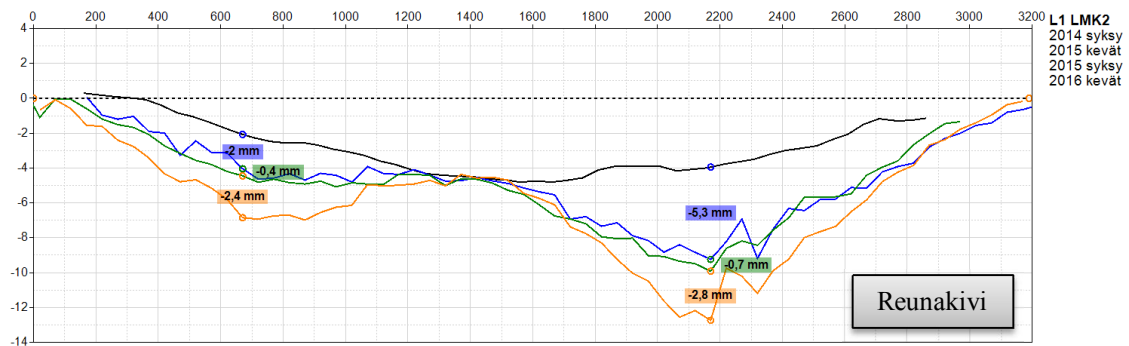
Profiilit I1 – I4, LMK foam, itään



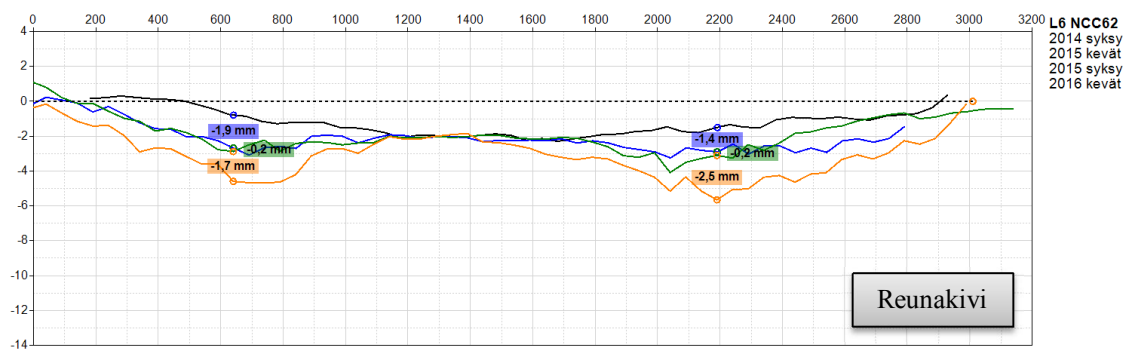
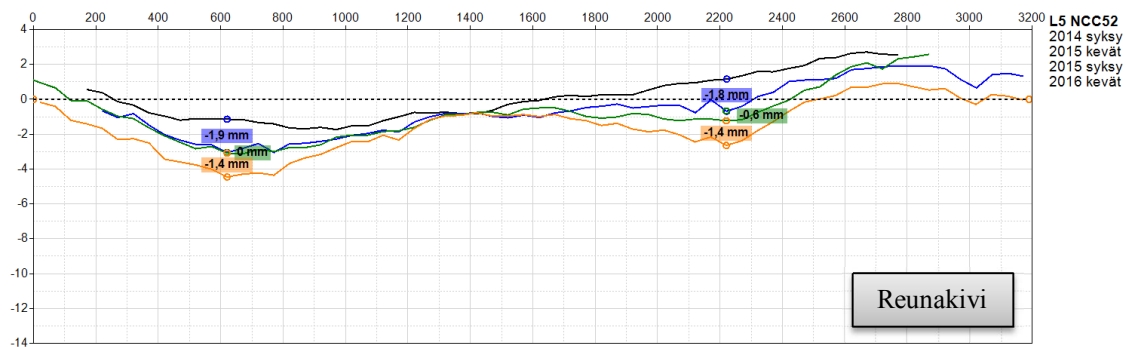
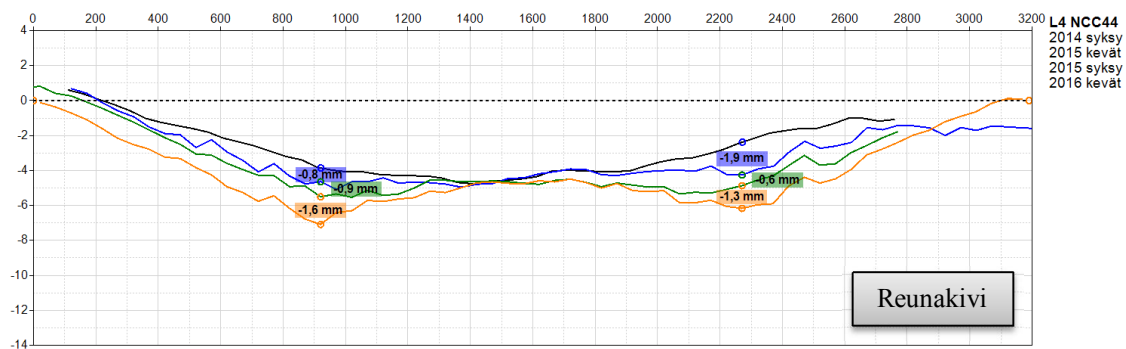
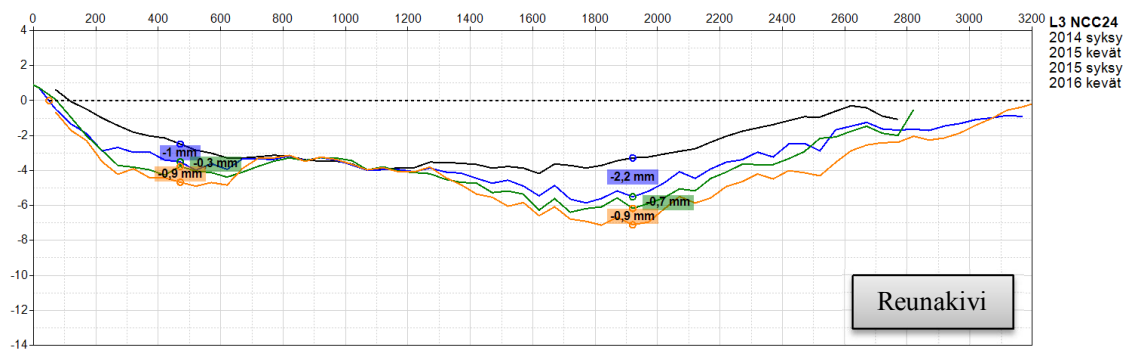
Profiilit I5 – I6, Green Asphalt, itään



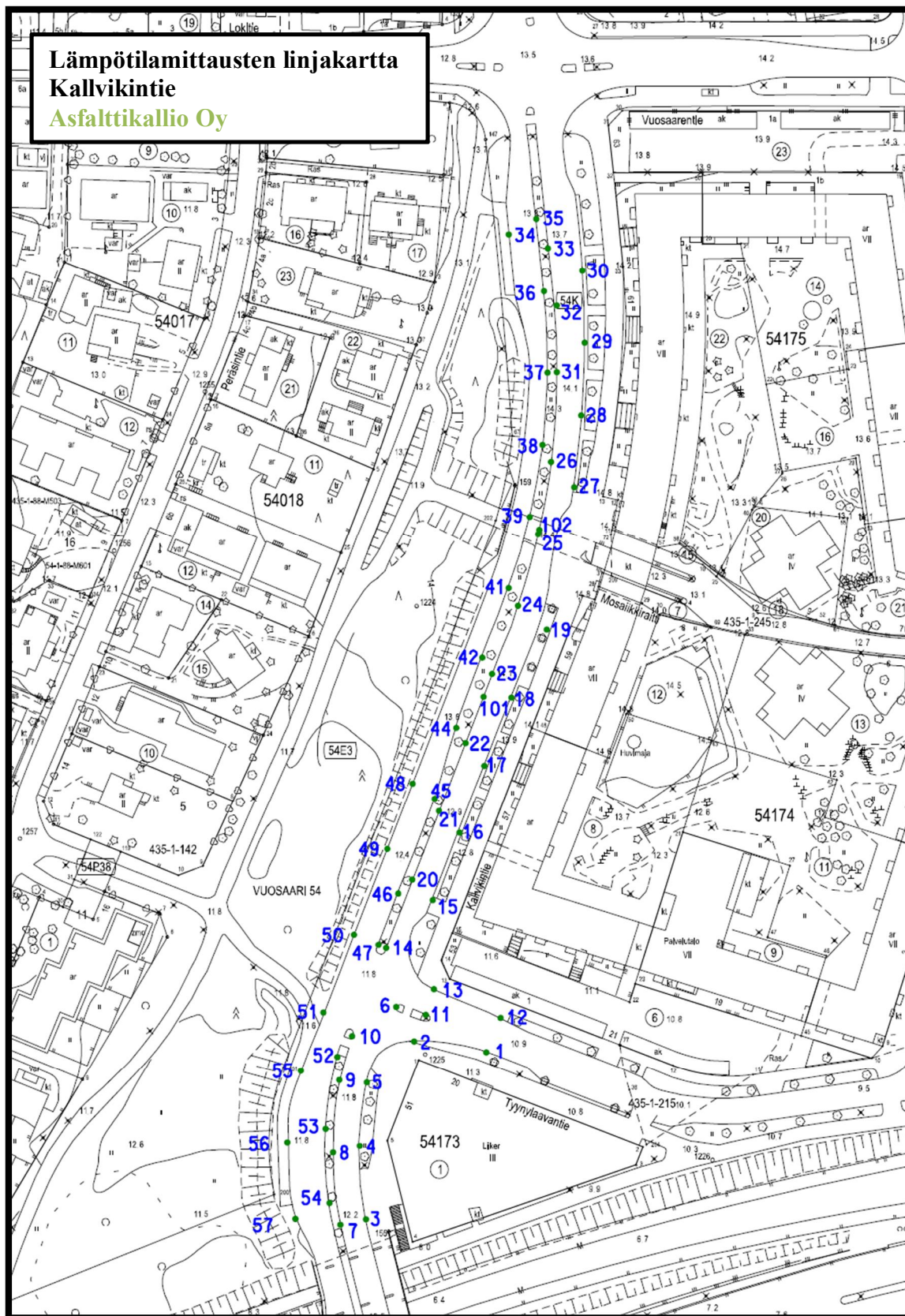
Profiilit L1 – L2, LMK foam, länteen



Profiilit L3 – L6, Green Asphalt, länteen



Liite 6. Kallvikintien levityslämpötilamittausten linjakartta sekä mittaustulokset



Kallvikintien levityslämpötilat, Asfalttikallio OyLevityslämpötilojen väriasteikot $T_{levitys}$ (°C)

<i>Yläraja</i>	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80
<i>Alaraja</i>	161	151	141	131	121	111	101	91	81	71

Linja	Et. P1 (cm)	Tlevitys P1 (°C)	Et. P2 (cm)	Tlevitys P2 (°C)	Et. P3 (cm)	Tlevitys P3 (°C)
1	100	143	180	135	280	140
2	80	135	160	132	240	133
3	80	145	140	133	240	139
4	80	140	140	141	240	145
5	80	137	140	136	240	137
6	100	138	220	143	340	148
7	100	148	180	141	260	152
8	100	145	180	145	260	148
9	100	138	180	142	260	144
10	100	133	180	124	260	114
11	100	140	200	134	300	136
12	80	108	160	128	240	135
13	100	150	200	143	300	131
14	100	150	200	142	300	143
15	60	130	120	122	180	118
16	60	150	120	147	180	149
17	60	147	120	145	180	146
18	60	112	120	119	180	113
19	60	132	120	132	180	134
20	100	141	200	138	300	140
21	100	143	200	138	300	145
22	100	142	200	141	300	144
23	100	126	200	123	300	131
24	100	140	200	140	300	140
25	100	137	200	136	300	133
26	100	148	200	143	300	145
27	80	99	140	111	220	112
28	80	152	140	150	240	151
29	60	121	120	115	180	120
30	60	156	120	158	180	156
31	60	127	120	135	180	130
32	60	145	140	144	240	137
33	60	139	120	133	240	140
34	60	143	140	136	240	138
35	100	135	200	138	300	138
36	100	143	200	143	300	144
37	100	136	200	138	300	145
38	120	145	240	140	360	141
39	120	148	240	158	360	151

41	120	138	240	139	360	141
42	120	126	240	132	360	130
44	80	146	160	135	240	150
45	80	122	180	125	280	130
46	80	77	180	87	280	82
47	80	125	180	130	280	133
48	80	134	180	122	280	121
49	80	120	180	115	280	95
50	80	149	180	141	280	135
51	100	127	200	127	300	125
52	80	142	180	142	280	144
53	80	146	180	135	280	145
54	80	152	180	154	280	157
55	80	125	160	116	240	115
56	80	133	160	128	240	130
57	60	94	140	95	220	94
101	100	120	200	110	300	120
102	80	85	140	87	200	87

Liite 7. Kallvikintien HVL- ja jäykkyyskokeiden tulokset

HVL-kokeet

Linja-Piste	h_{ka} (mm)	d_{ka} (mm)	Maks.voima (kN)	ITS (MPa)	$T_{levitys}$ (°C)	ρ_{bdry} sah. (Mg/m ³)	ρ_{mh} sah. (Mg/m ³)	V_m sah. (%)
46-1	28,7	100,8	7,668	1,685	77	2,374	2,509	5,4
46-3	28,9	100,9	8,594	1,879	82	2,389	2,499	4,4
49-3	28,8	100,7	9,673	2,121	95	2,425	2,519	3,7
57-1	28,9	100,6	8,566	1,875	94	2,404	2,493	3,6
57-2	28,8	100,8	8,821	1,936	95	2,396	2,493	3,9
57-3	28,6	100,9	5,328	1,174	94	2,269	2,480	8,5
X2-3	28,9	100,8	6,335	1,385	87	2,371	2,544	6,8
3-2	28,9	97,3	7,968	1,801	133	2,452	2,508	2,2
5-1	29,0	97,2	9,184	2,077	137	2,423	2,496	2,9
5-3	28,7	97,7	9,264	2,103	137	2,489	2,517	1,1
11-2	29,1	100,3	9,85	2,150	134	2,457	2,516	2,4
11-3	28,8	101,0	8,872	1,943	136	2,452	2,486	1,4
25-1	29,0	100,6	8,997	1,965	137	2,389	2,513	4,9
25-3	29,0	100,6	8,474	1,850	133	2,391	2,509	4,7
14-1	28,7	101,3	9,655	2,113	150	2,476	2,485	0,4
30-2	28,9	101,0	9,476	2,069	158	2,454	2,522	2,7
30-3	28,9	100,9	8,678	1,898	156	2,441	2,498	2,3
39-2	28,8	100,8	8,71	1,909	158	2,432	2,553	4,8
39-3	29,0	100,7	10,237	2,231	151	2,465	2,522	2,3
54-1	28,8	100,7	9,669	2,120	152	2,426	2,514	3,5
54-3	28,8	100,8	9,141	2,006	157	2,464	2,508	1,8
VP-1	30,5	99,0	12,118	2,558		2,494	2,538	1,7
VP-3	30,1	98,6	11,45	2,457		2,513	2,542	1,2
VP-4	30,3	98,7	13,345	2,842		2,477	2,528	2,0
VP-5	30,2	98,6	13,63	2,913		2,490	2,553	2,5
VP-7	30,4	98,6	12,548	2,667		2,450	2,548	3,8
VK-1	30,2	96,4	12,584	2,749		2,505	2,534	1,1
VK-3	30,1	100,6	13,661	2,872		2,474	2,523	1,9
VK-4	30,3	100,9	7,58	1,581		2,392	2,547	6,1

VP = Vertailu Porslahdentie, VK = Vertailu Kallvikintie

h_{ka} = Näytteen korkeuden keskiarvo (4 mittaus, SFS-EN 12697-29)

d_{ka} = Näytteen halkaisijan keskiarvo (6 mittaus, SFS-EN 12697-29)

ITS = Halkaisuvetolujuus (SFS EN 12697-23)

ρ_{bdry} = Kappaletiheys (SFS-EN 12697-6A)

ρ_{mh} = Maksimitiheys (SFS-EN 12697-5B)

V_m = Tyhjätila (SFS-EN 12697-8)

sah. = sahattu näyte (kaksiteräsaha)

Jäykkyyskokeet

Linja- Piste	h _{ka} (mm)	d _{ka} (mm)	Jäykkyys- mod. H (MPa)	Jäykkyys- mod. V (MPa)	Ero (%) *	Jäykkyys- moduuli (MPa)	T _{levitys} (°C)	ρ _{bdry} sah. (Mg/m ³)	ρ _{mh} sah. (Mg/m ³)	V _m sah. (%)	ρ _{bdry} sah. ero ka:sta (%) **
46-2	28,8	100,8	3720	3459	-7,0 %	3589,5	87	2,376	2,516	5,5	1,7
X2-1	28,9	100,7	3703	2446	-33,9 %	3074,5	85	2,340	2,503	6,5	3,2
X2-2	28,8	100,6	4042	3731	-7,7 %	3886,5	87	2,418	2,508	3,6	0,0
1-2	28,9	97,3	5383	4285	-20,4 %	4834	135	2,439	2,524	3,4	-0,9
5-2	28,9	97,3	4503	3377	-25,0 %	3940	136	2,478	2,514	1,4	-2,5
25-2	29,0	100,6	5842	4187	-28,3 %	5014,5	136	2,383	2,497	4,5	1,4
7-3	28,7	97,2	4061	3175	-21,8 %	3618	152	2,460	2,488	1,1	-1,7
30-1	28,8	100,8	4222	3441	-18,5 %	3831,5	156	2,445	2,478	1,3	-1,1
54-2	28,8	100,8	4625	4408	-4,7 %	4516,5	154	2,422	2,512	3,6	-0,2
VP-2	30,3	98,6	6638	5743	-13,5 %	6190,5		2,513	2,528	0,6	-1,2
VP-6	30,2	98,7	7243	6651	-8,2 %	6947		2,475	2,564	3,4	0,3
VK-2	30,1	100,6	7489	6063	-19,0 %	6776		2,496	2,566	2,7	-0,5
VK-5	30,1	100,8	7661	7272	-5,1 %	7466,5		2,452	2,570	4,6	1,3

VP = Vertailu Porslahdentie, VK = Vertailu Kallvikintie

*sallittu ero -20..10 %, **Sallittu ero ±1 %

h_{ka} = Näytteen korkeuden keskiarvo (4 mittausta, SFS-EN 12697-29)d_{ka} = Näytteen halkaisijan keskiarvo (6 mittausta, SFS-EN 12697-29)ρ_{bdry} = Kappaletiheys (SFS-EN 12697-6A)ρ_{mh} = Maksimitiheys (SFS-EN 12697-5B)V_m = Tyhjättila (SFS-EN 12697-8)

sah. = sahattu näyte (kaksiteräsaha)